

Sur le thème :

Etude de la dynamique spatiale du charançon du bananier, *Cosmopolites sordidus* (Germar) par marquage RFID.

Présenté par :

Anaïs Chailleux

Sous la direction de : Philippe Tixier

Ecole de rattachement : SupAgro Montpellier

Fabrice Vinatier

Soutenu le 24 septembre devant un jury composé :

Président : Yannick Outreman

Membre : Eric Haubruge

Jean-François Martin

Michel Martinez



**UPR Systèmes de culture
bananiers, plantains et
ananas**

Pôle de recherche agro-environnementale de la
Martinique (PRAM)

B.P. 214

F97285 Le Lamentin Cedex 2



Etude de la dynamique spatiale du charançon du bananier, *Cosmopolites sordidus* (Germar) par marquage RFID.

Afin d'acquérir les connaissances manquantes sur la dynamique spatiale de *Cosmopolites sordidus*, nous avons utilisé une méthode de marquage RFID (Radio Frequency Identification) permettant d'étudier le déplacement individuel des charançons. Le biais possible de cette méthode de marquage sur le déplacement des charançons a été testé. La puce n'interfère pas sur la capacité de l'insecte à rejoindre un point donné, en présence ou en absence de résidus. Puis, deux types d'essais ont été conduits sur des parcelles expérimentales, l'un pour étudier l'effet de la variété des bananiers plantés sur la dispersion des charançons (A) et l'autre l'effet de la présence de résidus de culture sur le sol sur la dispersion des charançons (B). Le pourcentage moyen de recapture variait entre 32 et 71%. La distance moyenne parcourue par les charançons par nuit dans l'essai A était 0.45m et dans l'essai B de 0.41m. Dans les deux essais les charançons ont bougé environ une fois en trois nuits avec de fréquents demi-tours. Il semble que les variétés n'influencent pas sur la dispersion du charançon. Par contre, les charançons sont attirés préférentiellement vers les résidus de culture. Ces résultats pourront être utilisés dans un modèle permettant de simuler la dynamique des populations de charançons du bananier selon différents agencements de parcelles.

Mots clés : *Cosmopolites sordidus*, Charançon du bananier, RFID, Radio télémétrie, Dynamique spatiale, Dispersion.

Using RFID tag to study spatial dynamics of banana weevil, *Cosmopolites sordidus* (Germar).

The banana weevil *Cosmopolites sordidus* (Germar, 1824) is the most important insect pest of bananas and plantains and it is spread everywhere in the area of bananas plantation. However, there is a lack of information on banana weevil spatial dynamics. We used radio telemetry with RFID (Radio Frequency Identification) to monitor individual dispersal of weevil in banana field. First we tested if the RFID tag affects the banana weevil movements. This test showed that there is no effect of the tag on the capacity of weevil to reach a point, with or without residues. Then two types of studies were carried out to test the effect of the banana variety on the dispersion of the banana weevil (A) and the effect of the presence of crop residues (cut leaves and pseudostem) on the dispersion of the banana weevil (B). The mean percentage of recapture in field studies was 41.3% and 61.3% for the study A and B, respectively. The mean distance of displacement over one night by weevil was 0.45m and 0.41m in the study A and B, respectively. In the two studies, banana weevil moved one time every three nights, with frequent u-turns. There was no influence of the variety of banana plant on the number of movement by night of banana weevil and on their distance of displacement over one night. The analyses of absolute angle for study B shown that movement of individuals released on bare soil were mostly oriented toward crop residues. These results will be used on a model to simulate banana weevil population dynamics in different field organisations.

Keywords: *Cosmopolites sordidus*, Banana weevil, RFID, Radio telemetry, Spatial dynamics, Dispersal.

AUTORISATION DE DIFFUSION DU MEMOIRE

1. Identification du rapport et de l'auteur

Nom et Prénom de l'auteur : Anaïs CHAILLEUX

Titre du mémoire : Etude de la dynamique spatiale du charançon du bananier, *Cosmopolites sordidus* (Germar) par marquage RFID.

2. Autorisation de diffusion par l'auteur

Par la présente, je déclare être titulaire du droit d'auteur pour le mémoire mentionné ci-dessus. J'autorise sans limitation de temps la Bibliothèque à diffuser ce mémoire dans un format électronique adapté et à effectuer toutes éventuelles modifications techniques nécessaires à une amélioration de la diffusion (modification du format) Dans le cas où ce mémoire est confidentiel, la confidentialité sera respectée dans les mêmes conditions pour les exemplaires électroniques et les exemplaires papiers.

Signature de l'Auteur : Anaïs CHAILLEUX

Date : 10/09/2009

3. Autorisation de diffusion par le Maître de stage

J'autorise par la présente, l'auteur à diffuser le mémoire mentionné ci-dessus

Intranet	OUI	NON	Prêt	OUI	NON
Internet	OUI	NON	Prêt entre bibliothèque	OUI	NON
Après une période de confidentialité	OUI	NON	Résumé diffusable	OUI	NON
Consultation en bibliothèque	OUI	NON	Reproduction	OUI	NON

Signature du Maître de stage : Philippe TIXIER

Date : 10/09/2009

4. Autorisation de diffusion par l'enseignant tuteur

J'autorise par la présente, l'auteur à diffuser le mémoire mentionné ci-dessus

Intranet	OUI	NON	Prêt	OUI	NON
Internet	OUI	NON	Prêt entre bibliothèque	OUI	NON
Après une période de confidentialité	OUI	NON	Résumé diffusable	OUI	NON
Consultation en bibliothèque	OUI	NON	Reproduction	OUI	NON

Signature du Tuteur enseignant : Yannick OUTREMAN

Date : 24/09/2009

CONCLUSION :

Confidentialité absolue :

OUI ☐

NON ☐

Durée exigée :

Le responsable de la spécialisation d'ingénieur agronome PPE, Professeur Serge KREITER

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement Philippe Tixier et Fabrice Vinatier, sans qui la réalisation de ce stage n'aurait pas été possible, pour leur encadrement, leur très grande disponibilité et leur bonne humeur.

Je remercie en particulier Fabrice Vinatier pour son aide sur le terrain et pour les traitements statistiques, pour son soutien et son appui tout au long du stage.

Je souhaite également remercier Pierre François Duyck pour sa disponibilité et ses conseils.

Merci à toute l'équipe, chercheurs, stagiaires et VCAT, pour leur dynamisme et leur bonne humeur.

Je remercie la direction du PRAM, en particulier Patrick Quénéhervé et Christian Chabrier, pour m'avoir accueilli dans leurs locaux pour mon stage de fin d'études.

Sommaire

INTRODUCTION.....	7
<u>1 BIBLIOGRAPHIE : DYNAMIQUE SPATIALE DU CHARANÇON DU BANANIER.....</u>	<u>9</u>
1.1 COSMOPOLITES SORDIDUS.....	9
1.1.1 BIOLOGIE	9
1.1.2 STATUT DE RAVAGEUR	10
1.1.3 DYNAMIQUE SPATIALE DES POPULATIONS DE CHARANÇONS.....	11
1.2 METHODES DE SUIVI DES POPULATIONS	12
1.2.1 METHODES DE CAPTURE/RECAPTURE DU CHARANÇON	12
1.2.2 METHODES DE MARQUAGE D'INSECTES.....	13
1.2.3 MARQUAGE RFID.....	14
<u>2 MATERIEL ET METHODE</u>	<u>16</u>
2.1 CAPTURE ET STOCKAGE DES INSECTES.....	16
2.1.1 LES CHARANÇONS.....	16
2.1.2 LE MARQUAGE	16
2.2 EFFET DE LA PUCE RFID SUR LE DEPLACEMENT DU CHARANÇON.....	16
2.3 EXPERIMENTATION EN PLEIN CHAMP	17
2.3.1 CARACTERISTIQUES DES ESSAIS	17
2.3.2 DEROULEMENT DES ESSAIS.....	17
2.4 CALCUL DES VARIABLES D'INTERET ET TESTS STATISTIQUES	18
2.4.1 ESSAIS PRELIMINAIRES	18
2.4.2 EXPERIMENTATIONS EN PLEIN CHAMP	18
<u>3 RESULTATS.....</u>	<u>20</u>
3.1 EFFET DE LA PUCE RFID SUR LE DEPLACEMENT DU CHARANÇON	20
3.2 EXPERIMENTATIONS EN PLEIN CHAMP	20
3.2.1 EFFICACITE DE LA METHODE	20
3.2.2 PARAMETRES DE DISPERSION DE L'INSECTE.....	21
3.2.3 EFFET DES VARIETES SUR LE DEPLACEMENT	22
3.2.4 EFFET DES RESIDUS SUR LE DEPLACEMENT.....	23
3.2.5 PROBABILITES DE PASSAGE D'UN HABITAT A UN AUTRE	24
<u>4 DISCUSSION.....</u>	<u>26</u>
4.1 L'EFFET DE LA PUCE RFID SUR LE DEPLACEMENT DU CHARANÇON	26
4.2 EXPERIMENTATION EN PLEIN CHAMP	26
4.2.1 EFFICACITE DE LA METHODE	26
4.2.2 PARAMETRES DE DISPERSION DE L'INSECTE	27
4.2.3 EFFET DES VARIETES SUR LE DEPLACEMENT	27
4.2.4 EFFET DES RESIDUS SUR LE DEPLACEMENT.....	28
4.2.5 PROBABILITES DE PASSAGE D'UN HABITAT A UN AUTRE	28
4.2.6 LIMITES ET PERSPECTIVES	28
CONCLUSION.....	30
LISTE BIBLIOGRAPHIQUE	31
ANNEXES.....	35

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résultats des tests du Khi-deux (χ^2) de comparaison entre des individus avec puces et des individus sans puce. -----	20
Tableau 2 : Résultats des tests du Khi-deux (χ^2) de comparaison entre les mâles et les femelles. -----	22
Tableau 3 . Récapitulatif des paramètres de dispersion. -----	22
Tableau 4 . Angles relatifs. -----	22
Tableau 5 . Résultat du test de Rayleigh sur les angles relatifs des essais A et B. -----	22
Tableau 6 : Résultat du test GLM avec pour variable à expliquer le nombre de mouvements par nuit. -----	23
Tableau 7 : Résultat du test GLM avec pour variable à expliquer la distance moyenne parcourue par nuit. -----	23
Tableau 8 : Essai B. Angles absolus. -----	24
Tableau 9 : Résultat du test d'uniformité de Rayleigh effectué sur les deux premiers angles absolus de la trajectoire des individus. -----	24
Tableau 10 . Habitats. Probabilité de passage dans l'essai A. -----	24
Tableau 11 . Habitats. Probabilité de passage dans l'essai B. -----	25

Liste des figures

Figure 1. Cycle de vie du charançon du bananier. -----	9
Figure 2 : Relation entre le pourcentage de baisse de rendement par rapport à la production maximale et la valeur du coefficient d'infestation.(Vilardebo, 1973) -----	10
Figure 3. Puce RFID, a peine plus grande que la pointe du stylo. -----	16
Figure 4. Description de la puce RFID -----	16
Figure 5. Matériel de détection.-----	17
Figure 6. Photographie d'une parcelle expérimentale et d'un charançon avec sa puce RFID. -	18
Figure 7. Pourcentage de recapture de l'essai A (sol nu et mélange variétal) et de l'essai B (organisation spatiale des résidus) en fonction du temps. -----	21
Figure 8. Cas de déplacement de l'essai A, individu n°D0A52. -----	20
Figure 9. Cas de déplacement de l'essai B, individus n°3A7CF. -----	20
Figure 10. Cas de déplacement de l'essai B, individu n°CEFOO. -----	20
Figure 11. Essai A. Distance par rapport au point de lâché en m. L'erreur affiché sur la moyenne est l'erreur standard.-----	21
Figure 12. Essai B. Distance par rapport au point de lâché en m. L'erreur affiché sur la moyenne est l'erreur standard.-----	21
Figure 13. Essai A. Fréquence des individus (%) en fonction de leur distance au point de lâcher (m) pour le jour 2. -----	21
Figure 14. Essai A. Fréquence des individus (%) en fonction de leur distance au point de lâcher (m) pour le jour 22.-----	21
Figure 15. Essai B. Fréquence des individus (%) en fonction de leur distance au point de lâcher (m) pour le jour 2. -----	21
Figure 16. Essai B. Fréquence des individus (%) en fonction de leur distance au point de lâcher (m) pour le jour 29.-----	21
Figure 17. Essai A. Fréquence des angles relatifs entre deux trajets pour les trajets inférieur à 1m. -----	22
Figure 18. Essai A. Fréquence des angles relatifs entre deux trajets pour les trajets supérieur à 1m.-----	22
Figure 19. Essai B. Fréquence des angles relatifs entre deux trajets pour les trajets inférieur à 1m. -----	22
Figure 20. Essai B. Fréquence des angles relatifs entre deux trajets pour les trajets supérieur à 1m.-----	22
Figure 21. Nombre d'individus sur chaque variété au cours du temps. -----	23
Figure 22. Fréquence des deux premiers angles des trajectoires des charançons lâchés après les résidus. -----	23

Figure 23. Fréquence des deux premiers angles des trajectoires des charançons lâchés dans les résidus.-----	23
Figure 24. Fréquence des deux premiers angles des trajectoires des charançons lâchés avant les résidus. -----	23
Figure 25. Ensemble des positions des charançons sur une parcelle élémentaire après le troisième jour. Superposition des 5 traitements ayant les résidus sur la diagonale gauche. ---	24
Figure 26. Ensemble des positions des charançons sur une parcelle élémentaire après le troisième jour. Superposition des 5 traitements ayant les résidus sur la diagonale droite.-----	24
Figure 27. Ensemble des positions des charançons sur une parcelle élémentaire après le troisième jour. Superposition des 5 traitements ayant les résidus répartis de façon homogène.-	24

Introduction

Cosmopolites sordidus (Germar, 1824) est un coléoptère de la famille des *Dryophthoridae*, c'est un ravageur actuellement présent dans toutes les bananeraies du monde. Son nom vernaculaire est le charançon du bananier, il est originaire du Sud-est asiatique, probablement de Malaisie et d'Indonésie, Java et Bornéo (Treverrow, 1985). Cette aire d'origine est similaire à celle du bananier (Stover et Simmonds, 1987). Il a ensuite progressivement envahi les plantations des différents pays tropicaux. Sa dispersion à travers le monde aurait eu lieu principalement entre 1836 et 1906, période des plus grands transports de matériel végétal à partir des Indes Néerlandaises, de Malaisie et d'Indochine, en direction des pays au sein desquels l'industrie bananière s'implantait petit à petit, notamment l'Afrique et l'Amérique tropicales (Cuillé et Vilardebo, 1963).

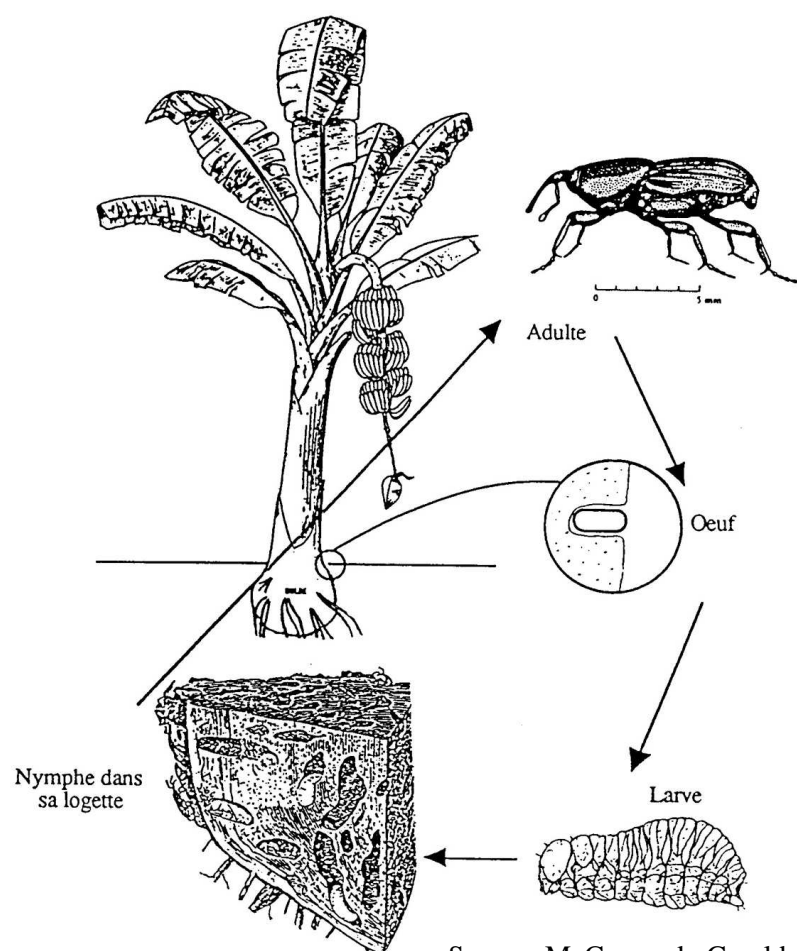
Ce ravageur cause de forts dégâts en particulier dans les bananeraies faiblement entretenues ou en conditions de stress (Bakyalire, 1992; Froggatt, 1925; Treverrow *et al.*, 1992; Veitch, 1929; Wallace, 1938). Aux Antilles, la première cause de dégâts provoqués par *Cosmopolites sordidus* est la chute des plants infestés qui sont fragilisés par les galeries des larves et déracinés par le vent. Or en Martinique la culture de banane représente 24,4% de la SAU en 2006 d'après des données de la DAF (Direction de l'Agriculture et de la Forêt) et 43% de la valeur ajoutée agricole en 2003 d'après des données de l'INSEE (Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques). La culture de la banane a aussi une importance majeure dans le monde, c'est le premier fruit exporté en terme de volume, et il est à la seconde place en terme de valeur après les agrumes. Les exportations totales de bananes ont représenté 16,8 millions de tonnes sur l'année 2006 d'après la FAO.

C'est pour lutter contre ce ravageur que la chlordécone, pesticide organochloré, a été utilisée. Aux Antilles Françaises, cette molécule est interdite depuis 1993 car c'est un polluant extrêmement rémanent dans l'environnement qui peut s'avérer très toxique. En effet la chlordécone a été classée comme cancérigène possible chez l'homme dès 1979. Elle est à l'origine d'une pollution importante en Guadeloupe et en Martinique découverte en 1999 : à certains endroits l'eau souterraine contient des taux de chlordécone 100 fois supérieurs à la norme.

Devant l'absence de lutte chimique efficace, des méthodes de lutte prophylactiques et par piégeage de masse sont envisagées. En effet, le fosthiasate est autorisé contre le charançon mais il est surtout efficace contre les nématodes, d'autre part il présente une forte toxicité pour les organismes aquatiques. La lutte peut s'effectuer par piégeage à l'aide de piège à phéromone, mais seule la fraction mobile de la population est touchée par cette méthode or elle est inférieure à la moitié de la population totale. Cette méthode semble inefficace en cas de forte infestation ou de conditions environnementales particulièrement favorables au charançon (Chabrier, 2005). La lutte prophylactique consiste à laisser les parcelles en jachères pendant au moins un an avant replantation et à replanter des vitroplants indemnes de charançons afin de limiter les possibilités de recontamination (Lassoudière, 2007). L'état sanitaire des parcelles, et en particulier la gestion des résidus de culture, joue un rôle important dans l'épidémiologie du charançon (Gold *et al.*, 2001).

L'importance des aspects spatiaux de la gestion des variétés et des résidus de culture dans les parcelles sur la dispersion du ravageur sont encore méconnus et nécessitent des études approfondies. Il est donc nécessaire d'étudier la dynamique spatiale de *Cosmopolites sordidus* afin d'améliorer les méthodes de lutte, en particulier du piégeage, et de proposer des alternatives, en jouant notamment sur l'impact du paysage sur le déplacement du charançon. La modélisation est un excellent outil pour tester l'effet des différents éléments du paysage sur la dynamique spatiale du charançon du bananier. Un modèle individu-centré nommé COSMOS intégrant l'ensemble des traits de vie de l'insecte (Vinatier *et al.*, 2009) est actuellement développé mais nécessite encore des approfondissements dans la manière de traiter le déplacement de l'insecte dans un environnement hétérogène.

Afin d'acquérir les connaissances manquantes sur la dynamique spatiale de cet insecte, nous avons utilisé une méthode de marquage RFID (Radio Frequency Identification) permettant d'étudier le déplacement individuel des charançons dans des parcelles de bananiers. Les paramètres des trajectoires individuelles (distance moyenne de déplacement, nombre de déplacement, angles relatifs et absolus de déplacements) ont été calculés pour chaque individu et chaque sexe dans un environnement hétérogène. L'hétérogénéité spatiale repose sur des différences d'habitat: variétés différentes et présence ou non de résidus dans les parcelles. L'objectif final de l'étude est d'acquérir des connaissances nouvelles sur le déplacement de cet insecte. *In fine*, ces connaissances pourront être implémentées dans le modèle individu centré COSMOS.



Source: McCormack, Gerald. Cook Islands Biodiversity Datatbase, 2009

Figure 1. Cycle de vie du charançon du bananier.

1 Bibliographie : Dynamique spatiale du charançon du bananier

1.1 Cosmopolites sordidus

1.1.1 Biologie

1.1.1.1 Cycle biologique

Cosmopolites sordidus mesure de 9 à 16 mm de long. Brun-rouge à l'émergence, il devient noir dans un délai variable selon les auteurs, 2-3 jours (Treverrow, 1985) ; 2-14 jours (Froggatt, 1925; Mestre, 1997); 22-60 jours (Cuillé, 1950). La durée de vie de certains spécimens excède 2 ans (Froggatt, 1925). Leur longévité moyenne au champ est variable selon les auteurs et les régions d'étude, estimée de 1 à 2 ans par Froggatt (1925) et de 12 à 18 mois aux Antilles par Vilardebo (1973) (**Figure 1**).

Il présente un cycle de vie de type K, avec une longue durée de vie et une faible fécondité, en comparaison avec d'autres insectes ravageurs comme les pucerons, par exemple. Selon Barbault (1997), les cycles de type K ont de meilleures aptitudes à la compétitivité qu'à la colonisation que ceux de type r, mais cette affirmation est à nuancer dans la mesure où il n'existe pas d'insectes connus comme étant en compétition avec le charançon dans les bananeraies.

1.1.1.2 Relation avec l'environnement

Le comportement de *Cosmopolites sordidus* vis-à-vis des facteurs de l'environnement a été particulièrement étudié par Cuillé (1950) et Cuillé & Vilardebo (1963). L'insecte présente un phototropisme négatif, un hygrotopisme et un thigmotactisme positifs, un instinct grégaire et une attitude feinte de mort (Delattre, 1980; Jardine, 1924; Treverrow et Bedding, 1993). Au laboratoire, *Cosmopolites sordidus* témoigne d'une faible résistance en atmosphère sèche : il meurt au bout de 12h à une humidité relative de 40% (Lemaire, 1996). A l'inverse, il résiste très bien à l'immersion et peut survivre une semaine dans un bac rempli d'eau (Cuillé, 1950). Son optimum thermique est de 25°C.

1.1.1.3 Plante hôte

Cosmopolites sordidus s'alimente principalement sur les souches sauvages et cultivées du genre *Musa* (banane, plantain, abaca) (Gold, *et al.*, 2001). Toutes les autres études portant sur l'existence d'hôtes alternatifs se sont révélées fausses (Arleu et Neto, 1984; Beccari, 1967; Moznette, 1920).

Au laboratoire, il semble que l'attractivité des bananiers sur les adultes de *C. sordidus* soit indépendante de la variété (Lemaire, 1996), la résistance variétale s'exprimant principalement sur les traits de vie des stades préimaginaux (Kiggundu *et al.*, 2007). La survie des larves dans le bulbe ainsi que leur vitesse de développement sont réduites dans les cultivars résistants (Kiggundu *et al.*, 2007). Les bananiers comprennent deux espèces principales, *Musa acuminata* (AA) (diploïde A), *Musa balbissa* (BB) (diploïde B). Les bananiers d'Afrique de l'est (*Musa* spp. AAA², sous-groupe EA) et les plantains (*Musa* spp. AAB), de même que les hybrides (AAB × AA), sont les plus sensibles à *Cosmopolites sordidus*. De hauts niveaux de résistance ont été rencontrés chez Yangambi-Km5 (AAA), GrosMichel (AAA), Kayinja (ABB, Pisang Awak subgroup), Ndiizi (AB, Ney Poovan subgroup) et Kisubi (Ney Poovan subgroup). La résistance la plus forte a été observée chez les hybrides TMB2×7197-2 et TMB2×8075-7 et chez le bananier sauvage Calcutta-4 (AA)(Kiggundu *et al.*, 2003).

1.1.1.4 Sexage

La distinction entre les mâles et les femelles a été étudiée d'un point de vue morphologique par Cuillé (1950) et par Longoria (1968). Les femelles sont généralement plus grosses que les mâles. De plus leur rostre est plus long et fin, la courbure est plus accusée, mais cette différence de taille

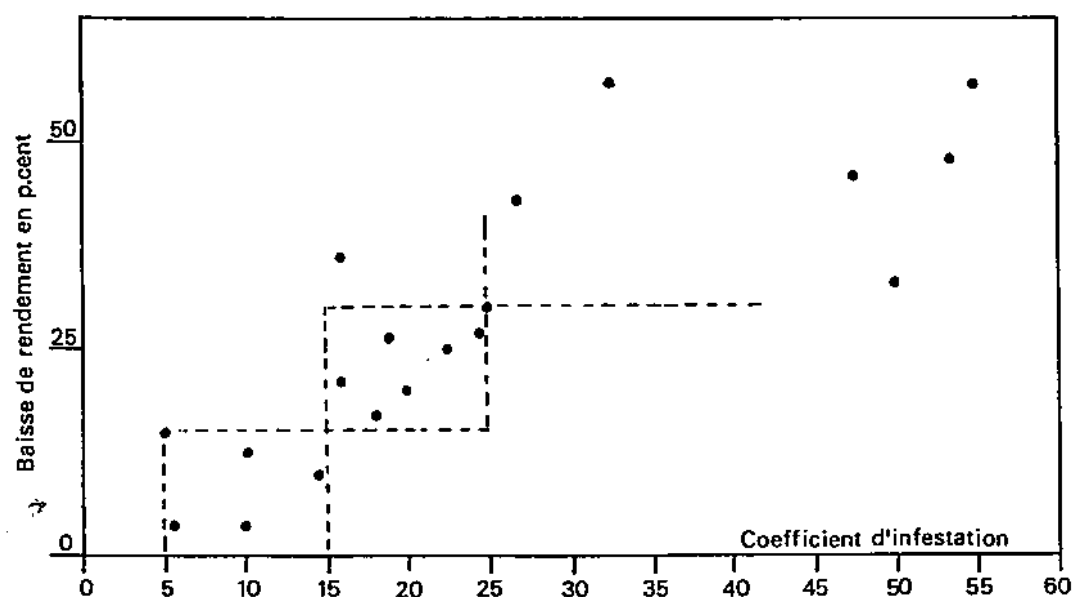


Figure 2 : Relation entre le pourcentage de baisse de rendement par rapport à la production maximale et la valeur du coefficient d'infestation.(Vilardebo, 1973)

n'intervient que pour 5% des individus (Mestre, 1995). Le rostre des femelles est plus brillant et rouge que chez les mâles ; il porte des ponctuations à la base qui n'atteignent pas son milieu alors qu'elles l'atteignent ou le dépassent chez le mâle (Longoria, 1968). Le sexage offrant la meilleure performance s'effectue à l'aide d'une loupe binoculaire d'après les microdépressions qui ponctuent le rostre.

Le sexe ratio (femelle: mâle) observé sur le terrain à partir de collectes a été mesuré égal à 1:1 en Guinée (Cuillé, 1950), au Kenya (Nahif *et al.*, 1994) et aux îles Canaries (Carnero *et al.*, 2002).

1.1.2 Statut de ravageur

1.1.2.1 Dégâts

L'adulte présente une certaine résistance au jeûne, mais il doit s'alimenter intensément en période d'activité normale. Il se nourrit principalement de bulbe et de rhizome de bananier (Cuillé, 1950). Néanmoins, l'essentiel des dégâts causés par *Cosmopolites sordidus* sur bananier est provoqué par l'alimentation des larves.

Ces dernières, en creusant des galeries pour s'alimenter à l'intérieur des bulbes de bananier, sont responsables de la rupture des tissus du corme qui sont constitués de fibres et de canaux vasculaires. Elles perturbent ainsi les communications entre la racine et les autres organes. De ce fait, un grand nombre de racines sont détruites. Les plants infestés sont plus fragiles et un grand nombre de bananiers peuvent être déracinés par le vent, ce qui est la première cause de dégâts de *Cosmopolites sordidus* aux Antilles. Les dégâts vont s'accumuler au fur et à mesure des cycles culturels, en fonction de l'accroissement de la population de l'insecte. Il a également été constaté un nanisme des bananiers adultes, la présence de régimes de petite taille et mal formés, et une diminution progressive du poids des régimes (Lemaire, 1996). En outre, ces galeries représentent une porte d'entrée à des agents pathogènes secondaires tels que *Ralstonia solanacearum* et *Fusarium oxysporum* (Castrillon, 1991) provoquant un pourrissement du corme.

La nuisibilité de *C. sordidus* dépend de la variété de bananier plantée, de son stade de développement, des conditions du milieu et les pratiques culturales (Gold, *et al.*, 2001). Dans le cas d'une replantation avec des bananiers comme culture précédente et en l'absence d'alternative pour l'insecte, les jeunes plants sont attaqués. Une seule larve, en détruisant le méristème apical, peut suffire à faire mourir un jeune plant (Mestre et Risède, 1997).

Vilardebo (1973) a étudié un coefficient d'infestation basé sur l'examen visuel des galeries creusées par les larves dans la zone corticale de la souche, qu'il a mis en relation avec les pertes de rendements. Il a mis en évidence, jusqu'à un certain degré d'attaque, une relation directe entre ce coefficient d'infestation et les pertes de rendement (**Figure 2**).

Une étude menée en plein champ entre 1994 et 2001 en Uganda a montré des pertes de récolte de 47% après 4 ans d'essai, dû à des diminutions du poids des régimes, à un moins grand nombre de régimes ainsi qu'à des pertes de bananiers (Gold *et al.*, 2004a). Une autre étude confirme ces résultats, les pertes de récolte sont de 5% pour le premier cycle et atteignent 44% au 4^{ème} cycle, d'après cette étude cela est principalement dû à la perte de poids des régimes (Rukazambuga *et al.*, 1998).

1.1.2.1 Densité de charançons et contamination des parcelles

Les densités de charançons dans les bananeraies ont été estimées par des techniques de marquage-recapture. Delattre (1980) a estimé ces densités dans 2 parcelles différentes à 2 600 individus/ha et 15 600 individus/ha, ce qui représente des densités de 10 à 337 adultes par pied. En Ouganda, les densités varient de 6 à 17 individus par pied (Gold, *et al.*, 2001), ce type de variabilité suggère que la gestion des cultures joue un rôle important dans la régulation des populations de charançons. Les fortes pressions ont souvent été associées à de faibles niveaux de gestion des cultures, des plantes stressées, un mauvais drainage, des sols acides ou avec une faible fertilité, un mauvais état

sanitaire, une sécheresse prolongée et une forte infestation de nématodes (Bakyalire, 1992; Froggatt, 1925; Treverrow, *et al.*, 1992; Veitch, 1929; Wallace, 1938).

Deux types de contamination peuvent survenir : les rejets plantés ("parcelle en baïonnette") peuvent contenir des œufs, des larves et occasionnellement des adultes et par conséquent il y aura contamination de la parcelle par de multiples foyers (Gold, *et al.*, 2001). Afin de préserver les parcelles saines, il est nécessaire de planter du matériel biologique sain (vitroplants). Sinon, une parcelle saine peut être contaminée par une parcelle avoisinante ayant des populations importantes de charançons. Des migrations d'individus surviennent le long des bordures jouxtant les parcelles contaminées. La colonisation est en général lente et des dégâts sont constatés au niveau des bordures (Mestre et Risède, 1997). Lorsque la parcelle est déjà infestée en charançons, une replantation sur précédent de bananier entraîne des dégâts importants (Mestre et Risède, 1997). Du fait de la faible fécondité des femelles, l'accroissement des populations est faible et nécessite plusieurs cycles avant d'être pleinement établi (Arleu et Neto, 1984).

Cuillé (1950) a décrit avec précision les différentes étapes de la propagation des dégâts de *C. sordidus*, dans des conditions de vie particulièrement favorables au développement du charançon du bananier :

1° L'introduction du charançon du bananier :

Ayant été réalisée de manière quelconque, il se crée un ou plusieurs foyers de multiplication.

2° L'invasion latente :

Après un temps variant de quelques mois à deux ans environ, les foyers de multiplication se sont développés et multipliés. C'est à ce stade qu'a lieu le déplacement des adultes. A ce stade de l'invasion, les souches ne contiennent que quelques larves souvent introduites à un stade avancé de végétation, les dégâts ne peuvent donc pas être nettement visibles. Il faut une dizaine de larves à l'intérieur d'un bulbe pour que la plante présente extérieurement des signes d'affaiblissement.

3° Dégâts de la végétation apparents mais épars :

L'invasion massive de toute la plantation, ou, plus particulièrement de certains secteurs, commence à produire en certains points des foyers de forte multiplication. En effet, *Cosmopolites sordidus* est capable d'émettre des phéromones d'agréations qui vont provoquer en un point donné un regroupement d'individus. Cependant, cette attraction ne peut se manifester que lorsqu'une certaine densité d'individus a déjà été créée par la reproduction naturelle de l'insecte.

Ces populations se créent donc dans une talle de bananier comportant plusieurs générations de rhizome. A ce stade, les bananiers atteints sont souvent déracinés par des vents violents et leur régime est atrophié.

4° Invasion localisée massive :

Le processus ci-dessus de formation de populations stables à chaque talle de bananier se poursuit petit à petit et gagne progressivement des parcelles de plus en plus grandes de la plantation. A ce stade, on remarque nettement par leur aspect extérieur les parcelles atteintes.

5° Invasion généralisée massive :

Si la plantation est particulièrement délaissée, la pullulation peut devenir d'une importance considérable ; chaque talle abrite un nombre suffisant de charançons pour attaquer systématiquement chaque nouveau rejet, peu nombreux sont les pieds arrivant à maturité. Ces derniers sont alors atteints de nanisme et porteurs d'un régime minuscule à une ou deux mains atrophiées. Ce degré d'invasion n'est atteint que dans des cas particuliers très rares en culture bananière normale.

1.1.3 Dynamique spatiale des populations de charançons

Les adultes vivent essentiellement dans les bananeraies, au niveau du sol et des débris végétaux. Leur mode de vie est nocturne et essentiellement fouisseur, ce dernier comportement pouvant

s'expliquer par son hygrophylie et son thigmotactisme (Cuillé et Vilardebo, 1963). Les individus suivent un rythme d'activité nyctéméral comprenant environ 12 heures de repos diurne. Ils se déplacent en marchant principalement pendant la première moitié de la nuit, l'activité des deux sexes étant légèrement décalée dans le temps (Lemaire, 1996).

Les adultes sont principalement retrouvés dans les résidus de culture et les environnements humides, comme les troncs coupés ou en décomposition, les bulbes coupés ou abîmés, ou cachés sous le sol (Pavis, 1988; Treverrow, *et al.*, 1992; Vilardebo, 1960; Vilardebo, 1973). Moznette (1920), Vilardebo (1960) et Treverrow *et al.* (1992) indiquent que les adultes sont en majorité associés aux troncs de bananiers, principalement dans les gaines des feuilles, autour des racines, sous les fibres à la base des plantes et occasionnellement dans les galeries larvaires. D'autre part, les adultes sont parfois retrouvés dans des zones ombragées et humides sous des arbustes durant le jour (Silva et Fancelli, 1998). En Ouganda, les adultes sont distribués à 41% à l'intérieur des pieds de bananier, 24% à la base des pieds et 28% dans les résidus coupés à immédiate proximité des pieds (0.5 mètre), tandis qu'une part négligeable des individus est retrouvée dans la litière ou le sol à plus de 0.5 mètre des pieds de bananiers (Gold, *et al.*, 2001). Les distributions sont identiques pour les mâles et les femelles. Le pseudo-tronc de bananier émet un signal favorable à l'infestation : il produit des composés volatils perçus à distance par les adultes, provoquant un déplacement orienté vers la source. Lorsque le pseudo-tronc est dégradé, après quelques jours de fermentation, il cesse d'être biologiquement actif. Ce dernier est particulièrement actif à partir du stade de préfloraison (Lemaire, 1996).

La dispersion de l'insecte se fait principalement par la marche, et semble limitée et lente. Moznette (1920) indique que la plupart des adultes demeurent à proximité de leur site d'émergence. Delattre (1980) a trouvé 90% des charançons recapturés après 3 jours à proximité de leur point de relâchement, mais après un mois il constate néanmoins une dispersion des individus marqués dans toute la parcelle. Whalley (1957) et Cardenas & Arango (1987) indiquent que les adultes ne se déplacent pas plus de 10 m après plusieurs mois. Les déplacements vont, selon les auteurs, de 6 mètres en une nuit à 60 mètres en 5 mois (Delattre, 1980; Wallace, 1938). Ces résultats sont à nuancer du fait que toutes ces études ont été réalisées à l'aide de capture-recapture, où la probabilité de recapture décline en fonction de la distance au point de relâchement. Les femelles semblent plus actives que les mâles, quittant les sites de relâchement plus rapidement et marchant de plus longues distances (Mestre et Rhino, 1997).

Le comportement exploratoire de *C. sordidus* est conditionné par un ensemble de facteurs environnementaux liés à des caractéristiques climatiques, physiques de la parcelle ou à des stimuli sémiologiques (Gold, *et al.*, 2001; Lemaire, 1996) (état et stade des bananeraies) ainsi qu'à des facteurs biologiques (comportement d'oviposition des femelles, recherche de partenaires sexuels). D'autre part, le charançon résiste très bien en vie ralentie, et il semble qu'une fraction importante de la population demeure immobile et sédentaire dans le sol (Gold, *et al.*, 2001; Vilardebo, 1960).

La question du vol est sujette à diverses interprétations selon les auteurs. Bien que l'adulte dispose d'ailes fonctionnelles, il n'a jamais été observé en vol (Froggatt, 1925; Gordon et Ordish, 1966; Greathead, 1986; Nonveiller, 1965; Pinese et Piper, 1994; Sponagel *et al.*, 1995; Waterhouse et Norris, 1987). Lorsqu'il est soumis à des conditions extrêmes où il ne peut s'extraire que par le vol, ce dernier préfère la marche, au risque de mourir (Lemaire, 1996). D'après Cuillé (1950), les vols nocturnes ne se produiraient que par de fortes hygrométries.

1.2 Méthodes de suivi des populations

1.2.1 Méthodes de capture/recapture du charançon

Diverses méthodes de capture/recapture sont utilisées pour *Cosmopolites sordidus*. Le piégeage des adultes à l'aide de morceaux de pseudo-tronc est un procédé qui a été mis au point en Australie par

Froggatt en 1923. Il consiste à déposer au pied des bananiers des fragments de pseudo-tronc coupés en deux longitudinalement et disposés à plat sur le sol. Moins de 24 heures après la pose de ces pièges, des charançons adultes sont retrouvés sur leur face inférieure. Une autre méthode de piégeage est le piégeage des adultes à l'aide de pièges sexuels. Les pièges sont de deux types : soit directement posés sur le sol, une rampe d'accès permettant aux charançons de tomber dans un bac, soit sous le niveau du sol (piège pitfall). L'intérieur des bacs est rempli d'eau savonneuse, et protégé de la pluie par un toit (leur circonférence est d'environ 20 cm). La phéromone d'agrégation (sordidine, noms commerciaux : Cosmolure® ou Cosmotrack®) est fixée sous le toit. Le rayon d'action estimé de ce type de piège est d'environ 20 mètres (Tinzaara *et al.*, 2005a).

Ces deux techniques sont inadaptées à l'étude de la dynamique spatiale de *Cosmopolites sordidus* à petite échelle puisqu'elles fonctionnent par attraction, elles orientent donc le déplacement des charançons. De plus, leur attractivité dépend des conditions climatiques (Tinzaara *et al.*, 2005b).

1.2.2 Méthodes de marquage d'insectes

Les diverses méthodes de marquage sont généralement utilisées afin d'isoler, au sein d'une population, des individus dont on souhaite connaître le devenir (durée de la survie, nombre des rencontres sexuelles, cause de la mort...), l'activité (déplacement, migrations, participation à des ouvrages sociaux...) ou d'estimer le nombre d'individus de la population par la technique de capture-marquage-recapture. Ces méthodes ont été présentées par Hagler *et al.* (2001)

1.2.2.1 Méthode nécessitant de retrouver l'insecte visuellement

- Au moyen d'étiquettes

Cette méthode concerne les insectes robustes, comme dans le cas des abeilles adultes. Les étiquettes sont bon marché et se prêtent à un suivi individuel, mais elles ne conviennent pas pour le marquage en nombre, et l'insecte, s'il n'est pas imago, s'en débarrasse avec la mue.

- Par des mutilations

Ce genre de marques, très utilisé chez les vertébrés, ne s'emploie que sur des espèces à cuticule robuste, comme des Coléoptères, dont les élytres peuvent se voir "ornés" de micro-piqûres. La méthode est simple mais longue et délicate.

- À la peinture ou à l'encre

L'application se fait, selon les cas, à la pince à dissection, à l'épingle entomologique, au pinceau "trois poils", au stylo. Les insectes peuvent être pris, marqués, repris, remarqués, plusieurs fois, pour un coût minime mais ces marques disparaissent avec la mue.

- À la poudre

Les soies, les écailles, les aspérités et les anfractuosités de la cuticule des insectes retiennent bien des particules très fines. Il existe des poudres fluorescentes de différentes couleurs, qui se prêtent bien au marquage (individuel ou de groupe). La détection se fait sous une lampe UV et des traces infimes sont ainsi repérables. Les traces de poudre laissées sur le trajet de l'insecte peuvent aussi être visualisées.

1.2.2.2 Méthode impliquant la mort de l'insecte pour la détection

- À la teinture

Il s'agit de colorer intérieurement les insectes. Le besoin en est apparu surtout avec le développement de lâchers de "mâles stériles" (lutte autocide). Il existe de nombreux colorants "vitaux" bien acceptés, détectables à l'œil et qui ont la propriété de marquer la descendance (au moins l'œuf) et, dans certains cas, les prédateurs et/ou parasitoïdes. Les usages des colorants sont restreints. Le

repérage des insectes marqués, sauf si ils sont transparents, implique le plus souvent de les écraser sur un buvard blanc et donc de tuer l'insecte.

- Avec des radio-isotopes

L'élément radioactif, choisi pour sa période adaptée à la durée de l'expérience, est administré à l'insecte via sa nourriture ou sa boisson. On détecte ensuite par un compteur Geiger-Müller ou par autoradiographie. La méthode n'est quasiment plus employée, pour des raisons de sûreté environnementale et du fait de l'existence de techniques alternatives analogues, moins chères.

- Avec des éléments rares

Les éléments utilisés sont le rubidium, le strontium, le césium, le samarium, l'euporium, etc. Leur teneur dans les insectes qui en auront ingéré artificiellement sera, bien qu'infime, très largement supérieure à celle relevée dans le milieu. Ces éléments se prêtent bien à l'automarquage, par la "contamination". Ils sont sans danger, persistent longtemps dans le corps de l'insecte mais ne se transmettent pas à la descendance. Leur détection est cependant délicate, pour certains éléments cela nécessite une source de neutrons.

- Aux anticorps

La technique, récente, consiste à marquer les insectes avec des anticorps de vertébrés, comme l'immunoglobuline G du lapin, dont on sait détecter des traces de façon sûre. L'application de la protéine se fait grâce à un nébulisateur. Le prix élevé de telles protéines reste un facteur limitant.

1.2.2.3 Méthodes permettant de multiples captures-recaptures

- Les radars

Il existe deux types de radars utilisés en entomologie, les premiers sont des radars permettant la détection d'insecte volant en altitude, les VLR (Vertical-looking radar). Il ne s'agit pas d'effectuer un suivi individuel mais de détecter la présence d'insecte et de mesurer certains paramètres comme leur poids. Ces radars ne peuvent pas être utilisés trop près du sol à cause des forts échos provoqués par la végétation et le sol, qui masque le signal retourné par l'insecte. Au contraire les radars harmoniques permettent de suivre des insectes au sol, cette technique utilise une forme de puce passive, elles peuvent être captées à des distances très grandes mais ne transmettent pas de code unique, elles sont donc sans intérêt pour un suivi individuel (Chapman *et al.*, 2000; Riley et Smith, 2000).

- Les systèmes RFID (Radio frequency identification)

Les systèmes RFID transmettent un signal radio à toutes les puces réceptives à cette gamme d'ondes. Ces puces répondent avec un signal codé qui permet l'identification individuelle de l'animal auquel elles sont rattachées. La position de la puce peut être connue car le détecteur doit être suffisamment près de la puce pour la détecter. Dans certains cas, la position de la puce peut être détectée grâce à la fréquence du signal sonore émis par le détecteur. Les fréquences radio utilisées par les systèmes RFID sont comprises entre 30 et 500 kHz pour les ondes courtes, et entre 900 MHz et 2.5 GHz pour les ondes longues (Reynolds et Riley, 2002).

1.2.3 Marquage RFID

Il existe deux types de puces électroniques, les puces actives et les puces passives.

Les puces actives contiennent une batterie interne, il s'agit d'un dispositif typique de lecture/écriture. Ces puces peuvent en principe être détectées à des distances très importantes, cependant il y a un lien direct entre le pouvoir de transmission et la durée de vie ainsi que la taille de la batterie. Ces puces ont récemment été suffisamment miniaturisées pour permettre leur utilisation sur de gros insectes marcheurs ou voliers. La plus légère puce active utilisée sur insecte pèse entre 0.47 et 0.52 g.

Les puces passives n'ont pas de batterie et ont donc une durée de vie illimitée, elles sont capables de recevoir l'énergie du détecteur par induction ou radiation afin de renvoyer leur code unique alphanumérique sur une fréquence appropriée. Leur distance de détection est faible, elle est comprise entre quelques centimètres et quelques mètres, selon leur taille. L'application majeure des dispositifs RFID comme marqueur d'animaux sauvages sont les «PIT (Passive Integrated Transponder) tag », des transpondeurs intégrés passifs, prévus pour être insérés sous la peau de l'animal ou dans sa cavité gastrique. Certaines puces sont suffisamment petites pour des applications entomologiques. Pour la plus petite actuellement utilisée, l'antenne, le compensateur et le circuit intégré du code rentrent dans une capsule de 8mm de long et pèse 0,06g (Reynolds et Riley, 2002).

Les puces RFID ont été utilisées sur divers types d'animaux, en particulier des reptiles, des amphibiens et des insectes. Mocinõ-Deloya (2008) a utilisé des transpondeurs intégrés passifs sur *Crotalus polystictus* en implantant les puces dorsolateralement au milieu du corps du serpent afin de suivre ses déplacements en zone cultivée Hamed et al. (2008) ont étudié le déplacement de salamandres à l'aide de transpondeurs intégrés passifs en saison sèche, obtenant des taux de recapture inférieurs à 10%. Cependant des expérimentations antérieures ont obtenu des taux de recapture de 35,7% en utilisant aussi des transpondeurs intégrés passifs (Blackwell et al. 2004 in (Hamed, *et al.*, 2008)), et des taux de 52.6% à 75% par radio télémétrie (Faccio 2003; Madison 1997; McDonough and Paton 2007; Montieth and Paton 2006 in (Hamed, *et al.*, 2008))

Hedin (2002) a utilisé la radiotélémétrie pour suivre un gros coléoptère, *Osmoderma eremita*. Il s'agit de la première fois où la radiotélémétrie a été utilisée sur un insecte voilier en plein champ. Les puces utilisées étaient actives, elles pesaient 0.48 à 0.52 g, l'antenne mesurait 50 mm. Ces puces pouvaient être détectées à 330 m, avec 50 à 100 m obtenu en routine. Chaque puce répondait à une fréquence différente (151.xxx MHz) de manière à identifier individuellement chaque insecte. Le contact a été perdu avec 71% des femelles et 20% des mâles avant la fin de vie normale de la batterie, pouvant aller jusqu'à 20 jours.

Concernant les insectes sociaux, les puces utilisées ont été extrêmement miniaturisées afin de ne pas gêner les insectes. Un système de récupération des données automatique à l'entrée des ruches ou des nids permet de relever le numéro de la puce ainsi que de connaître le sens de déplacement de l'insecte (entrée ou sortie du nid) (Streit *et al.*, 2003). Par exemple Sumner et al. (2007) ont utilisé des puces RFID passives afin de connaître le nombre de femelles quittant la ruche chez des populations sauvages de la guêpe sociale *Polistes canadensis*. Les puces étaient fixées au thorax de l'insecte et étaient ensuite détectées automatiquement par l'antenne fixée à l'entrée de la ruche, à chaque passage de l'insecte. Molet et al. (2008) ont étudié l'accumulation de provisions chez le bourdon *Bombus terrestris* en fixant des puces RFID passives (mic3®-TAG 64 bit RO) sur le pronotum de l'insecte. Ces puces mesuraient 1.0×1.6×0.5 mm.

Le charançon étant un insecte marcheur fouisseur au comportement cryptique, les méthodes de marquages visuelles sont inadaptées pour son suivi. Dans ce cas les méthodes de suivi par puces RFID semblent les plus prometteuses. D'autre part, il se déplace à priori sur de courtes distances, par conséquent les surfaces de relevé sont suffisamment faibles pour permettre un examen exhaustif de l'ensemble de la surface. Les distances de détection des puces peuvent donc être faibles et autorisent l'emploi de puces passives plutôt qu'actives dans le suivi.

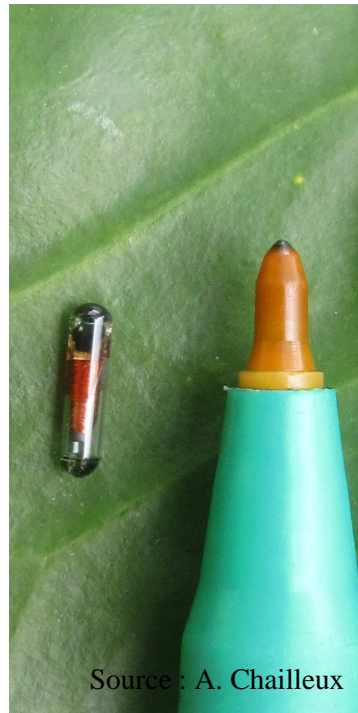


Figure 3. Puce RFID, à peine plus grande que la pointe du stylo.

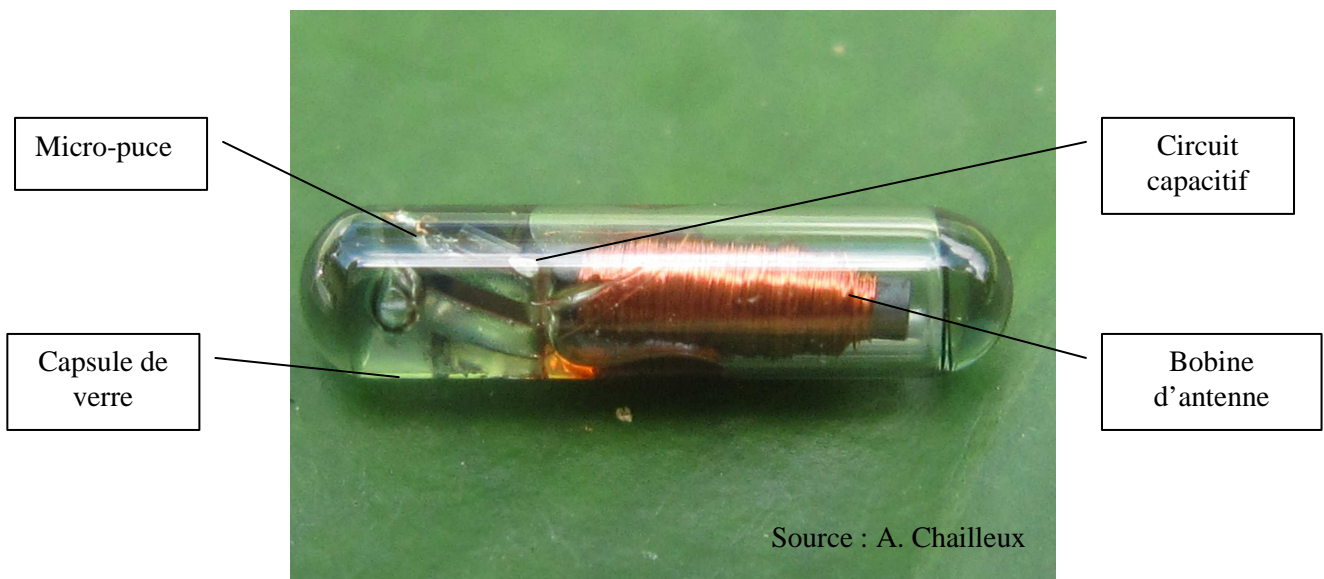


Figure 4. Description de la puce RFID

2 Matériel et méthode

2.1 Capture et stockage des insectes

2.1.1 Les charançons

Les charançons utilisés étaient des stades adultes capturés dans des pièges à phéromone et des pièges à pseudo tronc sur des parcelles privées en production. Ces pièges étaient relevés tous les 15 jours. Les charançons ont été stockés dans des boîtes en plastique de 40cm sur 80cm et 40cm de hauteur, dans lesquels de la terre et des pseudo-troncs avaient préalablement été déposés. Ce stockage était d'une durée de 2 semaines au plus à température ambiante.

Les charançons ont été sexés à l'aide d'une loupe binoculaire selon la méthode de Longoria (1968) et séparés dans des boîtes différentes pour les mâles et pour les femelles. Le poids moyen des charançons utilisés est de 0,074 g (poids moyen calculé sur 10 charançons).

2.1.2 Le marquage

Les puces utilisées sont des puces RFID passives produites par Biomark (référence: TXP148511B), elles sont de forme cylindrique et mesurent 8.5mm de long sur 2.12mm de diamètre, elles répondent à une fréquence de 134.2kHz ISO et pèsent 0.067g (**Figure 3 et 4**).

Les puces RFID ont été fixées par l'intermédiaire d'un fil sur le dos des charançons. La première extrémité du fil (tresse Daiwa 14kg, 0.260mm) a été détressée et fixée à l'aide de colle (super glue 3®) sur la puce. Cette dernière a ensuite été enrobée d'une seconde couche de colle (Epoxy). L'autre extrémité, d'une longueur d'environ 8 mm a été fixée sur les élytres du charançon avec la super glue 3®. Le poids ajouté par la colle et le fil amène les puces à un poids d'environ 0,086g (poids moyen mesuré sur quatre puces). Le collage des puces sur les charançons s'effectue le jour du lâcher.

Au total, 720 charançons ont été marqués, 360 mâles et 360 femelles.

2.2 Effet de la puce RFID sur le déplacement du charançon

Des essais préliminaires ont été mis en place afin de tester le biais possible de la méthode de marquage utilisée sur le déplacement des charançons.

Tous les tests préliminaires ont été effectués en chambre climatique à 25°C, l'optimum de l'espèce, à la lumière sur une planche de contreplaqué d'un mètre carré entourée de bacs. Les bacs permettaient la réception des charançons arrivant sur la bordure de la planche. Un cercle d'un mètre de diamètre a été tracé sur la planche.

L'effet de la puce est testé sur le déplacement sans résidus (I) et avec résidus (II). Pour l'essai (II) une couche de feuilles de bananier recouvre toute la surface du cercle. Cela a été testé sur les mâles et sur les femelles séparément.

Vingt charançons ont été lâchés au centre du cercle. Le nombre de charançons ayant atteint la circonférence du cercle a été compté au bout de 15 min puis 30 min (I), il a été compté une fois au bout de 5h30 pour l'essai (II) car les charançons se déplacent moins lorsque des résidus sont présents.



Figure 5. Matériel de détection.

Les charançons étaient retirés de la planche au fur et à mesure qu'ils atteignaient la circonférence. Les essais (I) et (II) sont effectués une fois avec des charançons sans puce, puis une seconde fois avec les mêmes charançons avec puce à un jour d'intervalle, selon le même protocole. Seulement pour l'essai (I) trois répétitions ont été effectuées et les proportions ont été cumulées sur les trois répétitions.

2.3 Expérimentation en plein champ

2.3.1 Caractéristiques des essais

Deux types d'essais ont été conduits, l'un pour étudier un effet variétal (A) et l'autre un effet résidus (B).

2.3.1.1 Les parcelles

Le dispositif expérimental était constitué de trois blocs complets randomisés. Chacun des trois blocs contient 4 traitements. Chaque traitement est un carré de 10m de côté et contient 25 bananiers plantés en quinconce. L'ensemble du dispositif mesure 40m de côté. Les blocs sont séparés par des ravines de 2m de large sur 1m de profondeur.

Les bananiers ont été plantés en novembre 2008 et étaient au stade floraison-récolte durant les deux expérimentations. La densité de plantation est de 2500 plants/ha. Les parcelles ont été désherbées chimiquement avant le début de l'essai, puis manuellement tout au long du suivi. Les régimes ont été récoltés au fur et à mesure de leur sortie. Trois variétés ont été plantées de manière homogène ou en mélange dans chaque traitement :

- le cultivar Cavendish (*Musa spp.*, AAA group, cv. Cavendish Grande Naine)
- l'hybride triploïde du CIRAD (FLHORBAN 924 cultivar, AAA group)
- le plantain (*Musa spp.*, AAB group, cv. Créole Blanche)

Pour l'essai B, les résidus sont disposés sur les mêmes parcelles de trois manières différentes, répartis de façon homogène sur le traitement en mélange variétal ou en ligne suivant l'une ou l'autre des deux diagonales sur les traitements en variétés homogènes.

Des cartographies des parcelles ont été effectuées, chaque bananier a été géoréférencé à l'aide d'un mètre enrouleur. Les plans ont été créés sur ArcView GIS 3.3.

2.3.1.2 Le matériel de détection

Le matériel utilisé est un système émetteur-récepteur portable (modèle FS2001 FR/ISOCB de Biomark, Bloise Idaho) (**Figure 5**). Il est constitué d'une unité émetteur-récepteur électronique et d'une antenne portable connectée à cette unité par un câble. Cet ensemble est capable de détecter des puces identifiées par fréquences radio et HDX (Half Duplex).

D'après des tests effectués localement, ce matériel est capable de détecter une puce placée sous lui sur le sol dès 20 cm de distance. Il peut détecter une puce jusqu'à 15cm sous terre (même en sol humide). En présence de débris de culture la puce peut être perçue sous 13 à 20cm de débris. Elle peut être détectée sous un pseudo-tronc de 10 cm tout autour du tronc, et sous un pseudo-tronc de 19 cm de chaque côté du pseudo-tronc. La distance de détection de la puce varie selon son orientation par rapport au détecteur. A l'air libre, si la puce est perpendiculaire à l'antenne elle peut être détectée dès 22cm de distance, alors que si elle se présente parallèlement à l'antenne elle ne peut pas être détectée avant 15cm de distance.

2.3.2 Déroulement des essais

2.3.2.1 Le lâcher

Les lâchers ont été effectués les 11 mai et 16 juillet respectivement pour les essais A et B. Sur chaque traitement 30 charançons ont été lâchés, 15 mâles et 15 femelles. Chaque charançon était



Figure 6. Photographie d'une parcelle expérimentale et d'un charançon avec sa puce RFID.

identifié individuellement par 5 caractères (lettres et chiffres). Les numéros des puces ont préalablement été enregistrés avec le sexe du charançon porteur de la puce et le bloc de lâcher.

Pour l'essai A le lâcher était effectué au pied du bananier central du bloc. Pour l'essai (B), le lâcher est effectué le long de la rangée centrale de bananiers, les charançons sont disposés tous les 20cm en alternant une fois sur deux un mâle et une femelle. L'orientation des charançons était aléatoire au moment du lâcher. Le lâcher était effectué en fin d'après midi afin de limiter la prédation par les oiseaux.

2.3.2.2 Le suivi

Le suivi a été effectué quotidiennement sur 30 jours à raison d'un relevé par jour les huit premiers jours, puis trois relevés la semaine suivante et enfin deux relevés la dernière semaine (essai A) et les deux dernières semaines (essai B). Chaque suivi a été organisé en trois phases:

(1) L'ensemble de la parcelle était systématiquement scanné. Lorsqu'une puce était identifiée, un piquet portant son numéro était planté à immédiate proximité du lieu d'identification, et une deuxième étiquette vierge était fixée sur le piquet (**Figure 6**).

(2) Le relevé des positions des piquets identifiés par les deux étiquettes était effectué sur une carte du bloc (format papier A3).

(3) Enfin, la position de chaque individu (coordonnées en x, y et localisation : bananier, sol nu, résidus de culture) a été rentrée sur Excel à partir de la carte papier et la cartographie sur le logiciel ArcView.

Au total pour chaque jour, la détection, le relevé des positions au champ et la saisie sur ordinateur prennent respectivement 6h, 1h30 et 2h30 à une seule personne, soit 30 secondes par mètre carré. En fin d'essai, toute la surface d'expérimentation a été systématiquement fouillée afin de retrouver le maximum de puces et de définir leur état quand la puce était visible.

2.4 Calcul des variables d'intérêt et tests statistiques

Toutes les statistiques et calculs ont été effectuées à l'aide du logiciel R 2.9.0 (R_Development_Core_Team, 2009) à l'aide des packages spatstat (cartographies), adehabitat (analyse des trajectoires), circStats (analyse des distributions des angles) et TramineR (analyse des séquences d'événements).

2.4.1 Essais préliminaires

Le test du χ^2 d'homogénéité a été utilisé, ce test permet de savoir si deux listes de nombres de même effectif peuvent dériver de la même loi de probabilité.

Ce test suit l'équation suivante :

$$\sum_{i=1}^m \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

Avec O_i pour les valeurs observées et E_i pour les valeurs espérées

2.4.2 Expérimentations en plein champ

2.4.2.1 Les variables

- Pour chaque individu et sur toute la durée de l'expérimentation sont calculés :
 - La durée de vie effective : basée sur l'hypothèse que pour les charançons n'ayant pas été retrouvés vivants (mort ou non retrouvé) à la fin de l'essai, l'individu est considéré comme vivant jusqu'à son dernier déplacement, puis son statut est indéfini et il n'est pas comptabilisé par la suite.

- La caractéristique de sa trajectoire : distance entre point de lâcher et le relevé, distance cumulée de chaque élément de la trajectoire, angle absolu formé par chaque segment de trajectoire avec le plan du bloc, angle relatif entre chaque segment de trajectoire.

- Pour l'ensemble des individus et à chaque pas de temps :

- Le nombre de mouvements par nuit est calculé : il correspond au nombre de mouvement détecté divisé par le nombre de nuit de vie effective.

- La distance parcourue par nuit : elle correspond à la distance cumulée totale divisé par le nombre de nuit de vie effective.

2.4.2.2 GLM

Le test statistique GLM (Generalised Linear Model) permet de tester l'effet de plusieurs facteurs sur une variable. Pour l'essai A une loi normale a été utilisée avec sa loi naturelle identité, pour l'essai B une loi de poisson a été utilisée avec sa loi naturelle logarithme.

2.4.2.3 Test de Kolmogorov-Smirnov

Le test de Kolmogorov-Smirnov est un test d'hypothèse utilisé pour déterminer si un échantillon suit bien une loi donnée connue par sa fonction de répartition continue, ou bien si deux échantillons suivent la même loi.

Ce test repose sur les propriétés des fonctions de répartition empirique : si (x_1, \dots, x_p) est un échantillon de n variables aléatoires indépendantes à valeurs réelles, alors la fonction de répartition empirique de cet échantillon est définie par avec

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \delta_{x_i \leq x} \quad \text{Avec} \quad \delta_{x_i \leq x} = \begin{cases} 1 & \text{si } x_i \leq x \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

2.4.2.4 Statistiques circulaires

Des statistiques circulaires ont été utilisées car l'algèbre angulaire diffère des tests statistiques traditionnels. Les statistiques circulaires se basent sur la distribution de von Mises (distribution circulaire normale).

La fonction de densité de probabilité de von Mises pour l'angle x est donnée par :

$$f(x | \mu, k) = \frac{e^{k \cos(x - \mu)}}{2\pi I_0(k)}$$

Le test d'uniformité de Rayleigh a été utilisé. L'hypothèse nulle est que les angles sont uniformément distribués, c'est à dire que des mouvements se produisent dans toutes les directions à la même fréquence. L'hypothèse alternative est que les angles ont une direction moyenne spécifique.

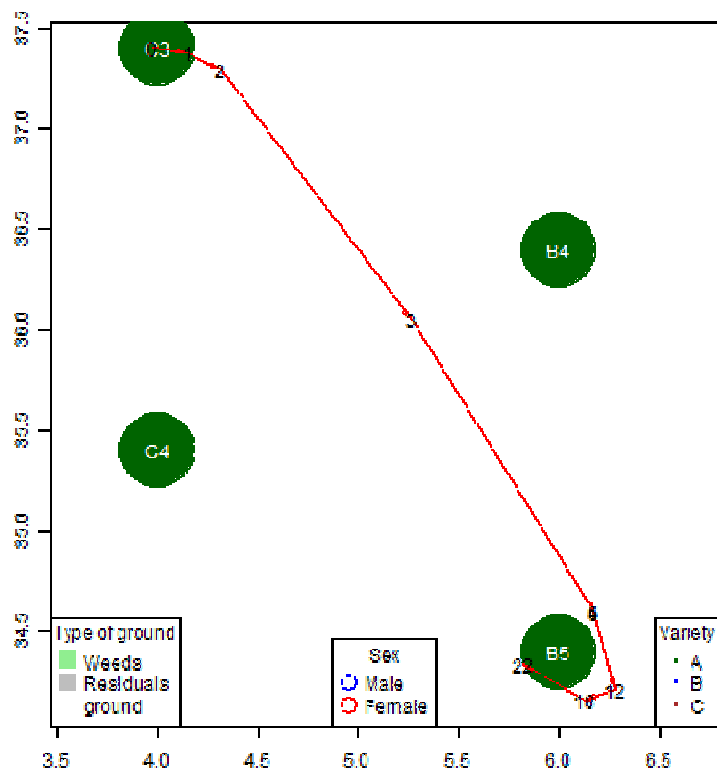


Figure 8. Cas de déplacement de l'essai A, individu n°D0A52.

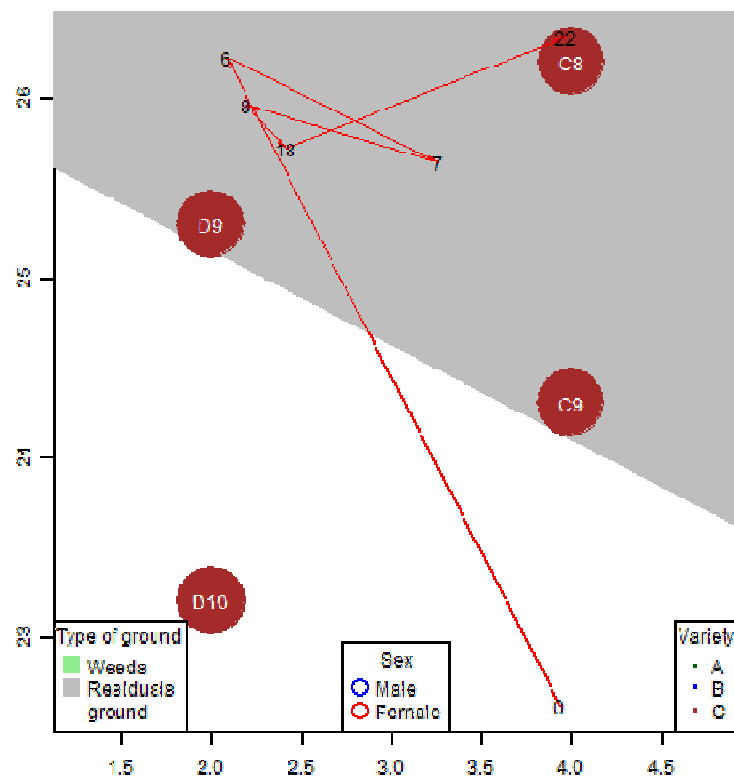


Figure 9. Cas de déplacement de l'essai B, individus n°3A7CF.

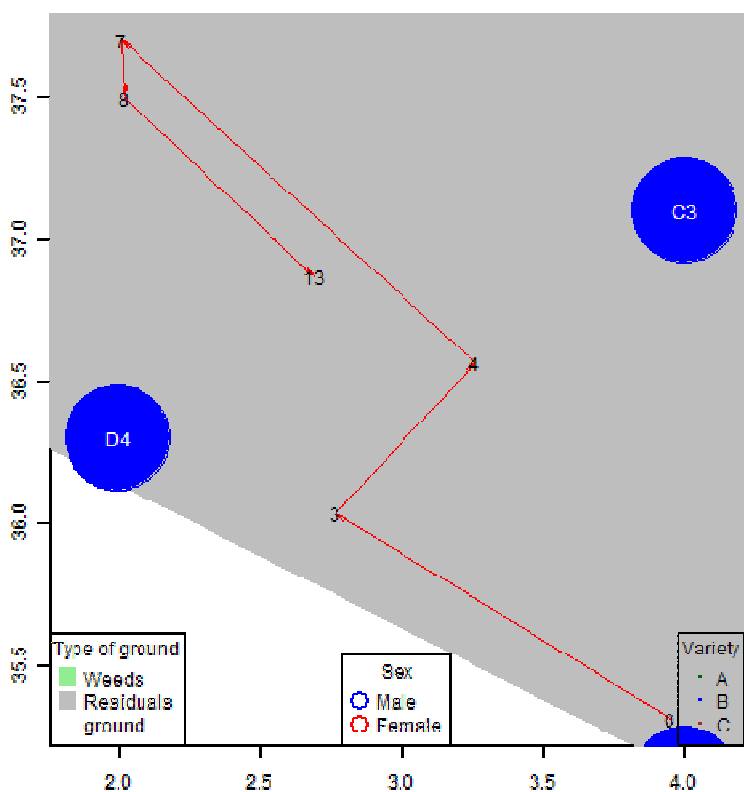


Figure 10. Cas de déplacement de l'essai B, individu n°CEFOO.

3 Résultats

3.1 Effet de la puce RFID sur le déplacement du Charançon

Aucune différence significative n'a été montrée, ni pour les mâles ni pour les femelles, entre les proportions d'individus de l'essai sans puce et de l'essai avec puce ayant atteint le bord du cercle (**Tableau 1**). Aucune différence significative n'est non plus observée entre les mâles et les femelles (**Tableau 2**). Ces résultats nous permettent de valider l'hypothèse que la présence de la puce RFID ne modifie pas significativement les déplacements du charançon.

Tableau 1 : Résultats des tests du Khi-deux (χ^2) de comparaison entre des individus avec puces et des individus sans puce.

Essai	Sexe	Durée	Test χ^2
sans résidus	Mâles	15 min	p = 0.4135
		30min	p = 0.2057
	Femelles	15 min	p = 1
		30 min	p = 1
avec résidus	Mâles	5h30	p = 0.112
	Femelles	5h30	p = 1

Tableau 2 : Résultats des tests du Khi-deux (χ^2) de comparaison entre les mâles et les femelles.

Essai	Puce	Durée	Test χ^2
sans résidus	absence	15 min	p = 0.8421
		30 min	p = 0.5569
	présence	15 min	p = 0.833
		30 min	p = 1
avec résidus	absence	5h30	p = 0.2008
	présence	5h30	p = 0.7506

3.2 Expérimentations en plein champ

3.2.1 Efficacité de la méthode

Le nombre de puces détectées sur le terrain variait entre 62 et 179 pour l'essai A et entre 167 et 244 pour l'essai B. Le pourcentage moyen de puces retrouvées pour l'essai A était de 41,3% ($\pm 2,3\%$), avec pour minimum 24.4%. et pour maximum 52.6%. Pour l'essai B il était de 61.13% (± 1.75) avec pour maximum 46.8% et pour minimum 71.3% (**Figure 7**). Une légère baisse du taux de recapture a été observée sur le deuxième jour de suivi, puis il a été nettement croissant le troisième jour pour l'essai A et le quatrième et cinquième jour pour l'essai B. Ensuite il est resté stable au cours du temps, entre 40% et 50% pour l'essai A et entre 60% et 70% pour l'essai B. Dans l'essai A nous avons observé un taux de recapture assez faible le huitième jour, c'est le taux de recapture minimum pour cet essai.

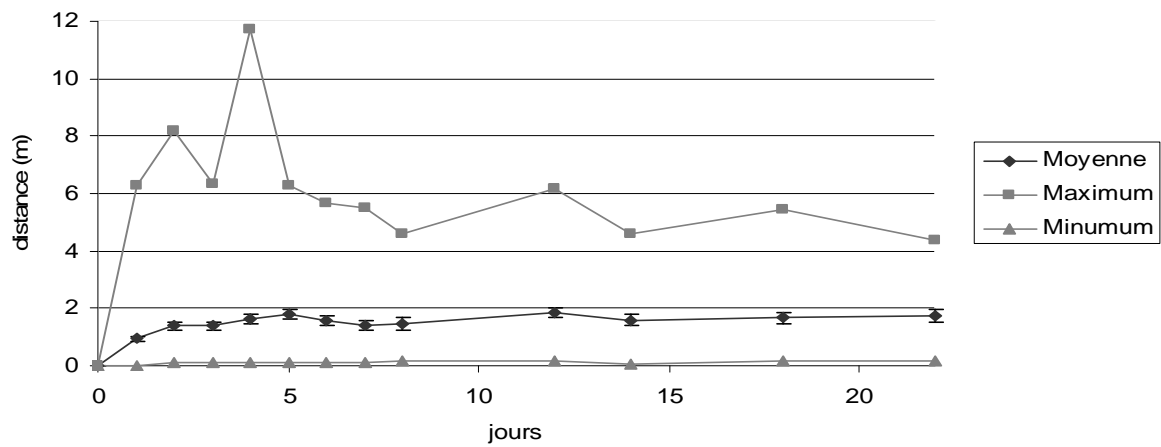


Figure 11. Essai A. Distance par rapport au point de lâché en m. L'erreur affichée sur la moyenne est l'erreur standard.

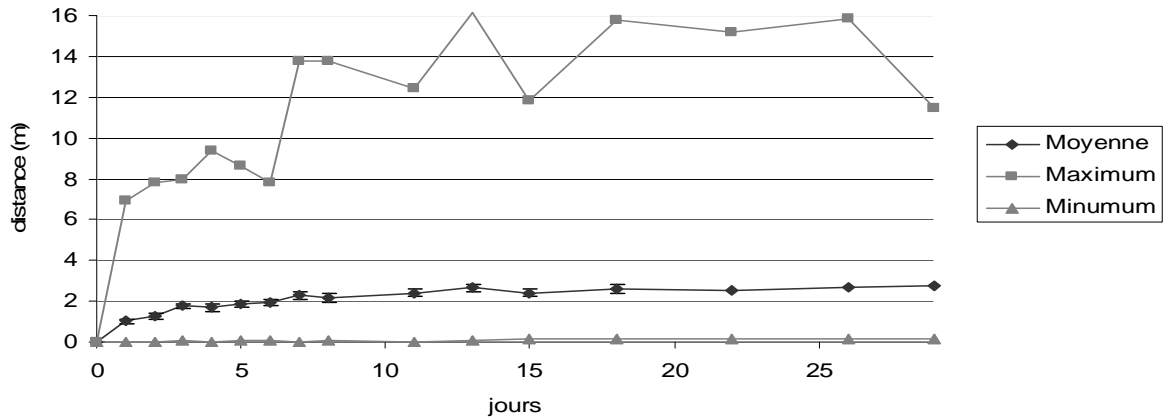


Figure 12. Essai B. Distance par rapport au point de lâché en m. L'erreur affichée sur la moyenne est l'erreur standard.

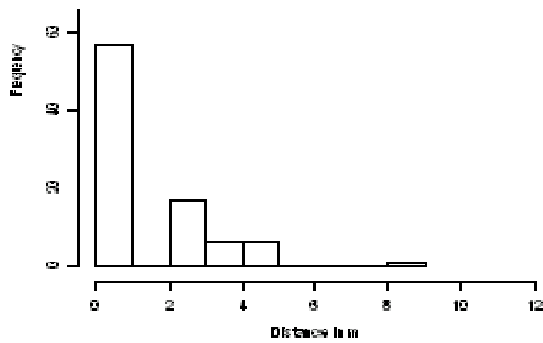


Figure 13. Essai A. Fréquence des individus (%) en fonction de leur distance au point de lâcher (m) pour le jour 2.

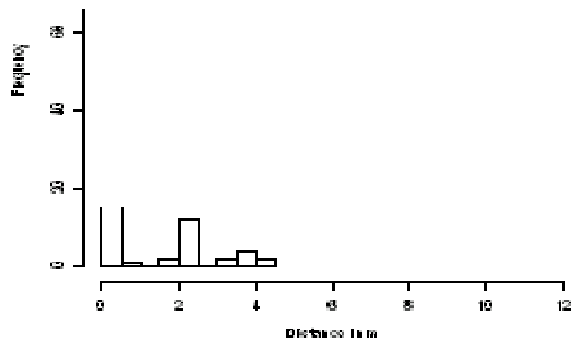


Figure 14. Essai A. Fréquence des individus (%) en fonction de leur distance au point de lâcher (m) pour le jour 22.

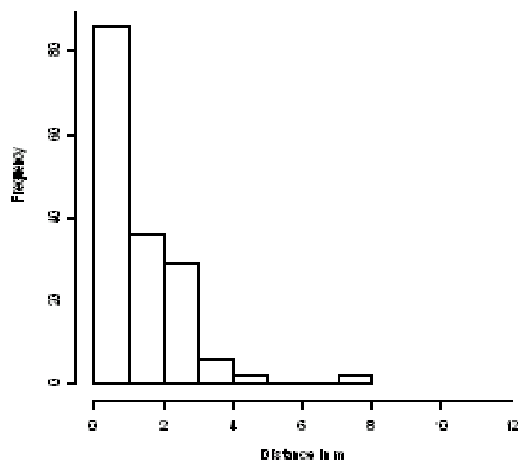


Figure 15. Essai B. Fréquence des individus (%) en fonction de leur distance au point de lâcher (m) pour le jour 2.

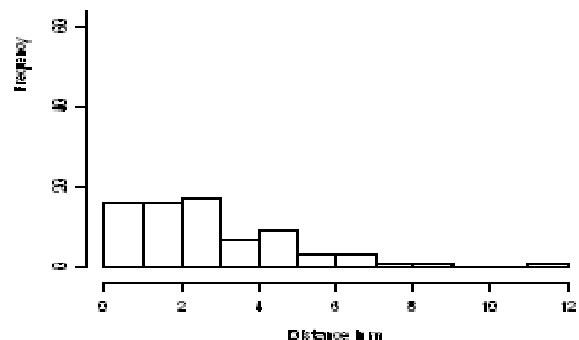


Figure 16. Essai B. Fréquence des individus (%) en fonction de leur distance au point de lâcher (m) pour le jour 29.

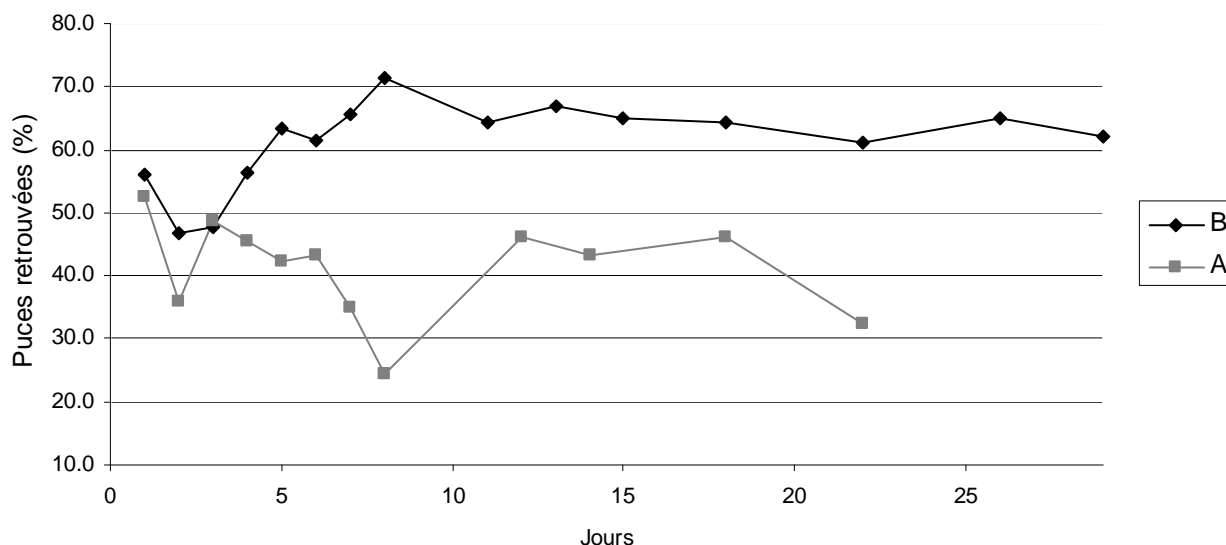


Figure 7. Pourcentage de recapture de l'essai A (sol nu et mélange variétal) et de l'essai B (organisation spatiale des résidus) en fonction du temps.

3.2.2 Paramètres de dispersion de l'insecte

Le suivi individuel nous a permis de visualiser la position des charançons à un temps t (**Annexe I**) mais surtout de dresser les cartographies des trajectoires individuelles et de l'ensemble des individus (**Annexe II et IIbis**). Dans l'essai A, nous avons observé majoritairement des trajectoires de type : trajet long (déplacement vers un bananier) puis trajets courts correspondant au déplacement autour du bananier (**Figure 8**). Dans l'essai B, nous avons observé des trajectoires différentes selon la position de lâcher. Pour les individus lâchés en dehors des résidus nous avons observé principalement :

- les mêmes types de trajets que pour l'essai A, ou
- un trajet du type : trajet long (déplacement vers les résidus) puis un trajet court ou intermédiaire (déplacement dans la zone de résidus) (**figure 9**).

Pour les individus lâchés dans les résidus, nous avons observé le plus souvent des trajectoires associant trajets courts autour d'un résidu et trajets d'un résidu à un autre (**figure 10**).

Les individus de l'essai A ont été suivis en moyenne 11.9 jours (± 0.5) et les individus de l'essai B en moyenne 21.2 (± 0.5) jours.

La distance moyenne parcourue par les charançons dans l'essai A était de 0.45m par nuit (± 0.04) et dans l'essai B de 0.41m par nuit (± 0.02) (**Tableau 3**). La distance moyenne parcourue par les charançons entre le point de lâcher et le dernier jour était de 1.72m (± 0.23) pour l'essai A et de 2.76m (± 0.25) pour l'essai B. La distance maximale parcourue à partir du point de lâcher était de 11.74m le quatrième jour pour l'essai A et de 16.13m le treizième jour pour l'essai B (**Figure 11 et Figure 12**). Les proportions de recapture par rapport au point de départ ont pu être évalués jour après jour (**Figure 13, 14, 15 et 16**). Nous avons observé que les proportions d'individus se déplacent vers des distances d'éloignements de plus en plus grandes au cours du temps.

Dans les deux cas les charançons ont bougé environ une fois en 3 nuits (**Tableau 3**).

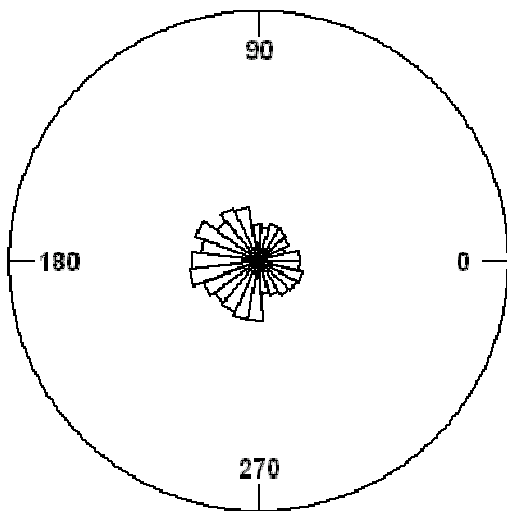


Figure 17. Essai A. Fréquence des angles relatifs entre deux trajets pour les trajets inférieurs à 1m.

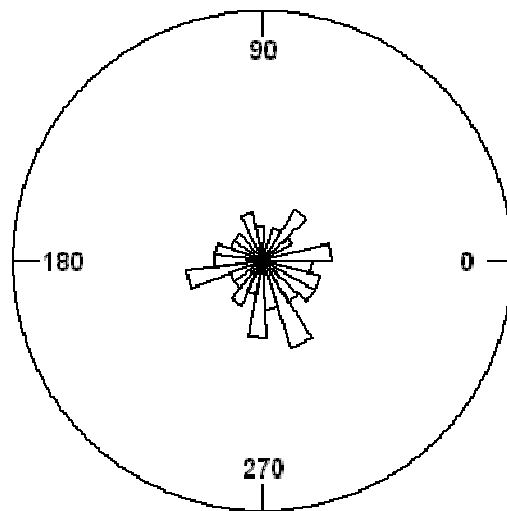


Figure 18. Essai A. Fréquence des angles relatifs entre deux trajets pour les trajets supérieurs à 1m.

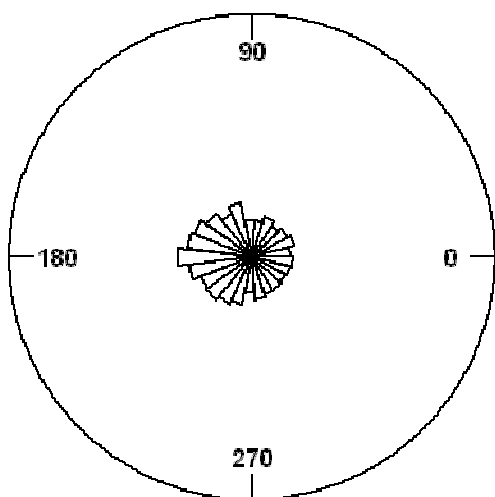


Figure 19. Essai B. Fréquence des angles relatifs entre deux trajets pour les trajets inférieurs à 1m.

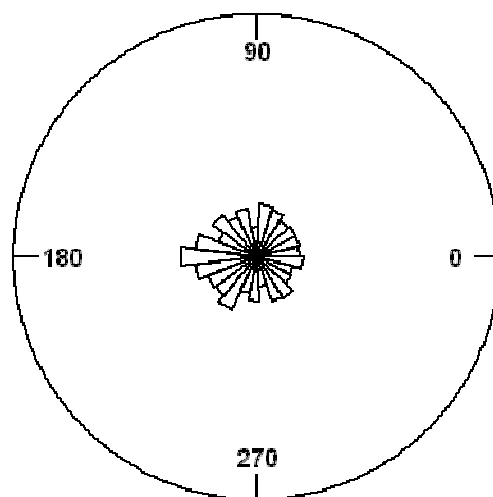


Figure 20. Essai B. Fréquence des angles relatifs entre deux trajets pour les trajets supérieurs à 1m.

Tableau 3. Récapitulatif des paramètres de dispersion. D, distance totale moyenne parcourue sur la durée de l'essai en mètre ; d, distances moyenne parcourue par nuit en mètre ; m, nombre moyen de mouvement par nuit.

		D	d	m
A	minimum	0.13	0.02	0.04
	maximum	13.47	3.24	2
	moyenne	1.87	0.45	0.36
	erreur standard	0.11	0.04	0.02
B	minimum	0.04	0.01	0.05
	maximum	23.84	4.23	1.00
	moyenne	5.22	0.41	0.39
	erreur standard	0.11	0.02	0.01

Les charançons tournaient entre 2 segments de trajectoire en moyenne de $-163^\circ (\pm 46^\circ)$ pour l'essai A et $171^\circ (\pm 41^\circ)$ pour l'essai B (**Tableau 4**). Les **figures 17, 18, 19, 20** montrent la fréquence de chaque angle, on observe une majorité d'angles compris entre 90° et 270° sauf pour les trajets supérieurs à 1m de l'essai A. Le test de Rayleigh indique qu'il y a une direction moyenne significative du mouvement des charançons par rapport à leur trajet précédent, qui correspond à faire demi-tour (**Tableau 5**).

Tableau 4. Angles relatifs. \bar{a} , moyenne des angles ; Var, variance circulaire ; Min, valeur minimum observée ; Max, valeur maximum observée.

	\bar{a}		Var		Min		Max	
	RAD	DEG	RAD	DEG	RAD	DEG	RAD	DEG
A	-2.839	-162.67	0.803	46.01	0.01	0.57	3.11	178.19
B	2.98	170.73	0.732	41.95	0.01	0.57	3.13	179.34

Tableau 5. Résultat du test de Rayleigh sur les angles relatifs des essais A et B. Var, variance circulaire.

	1-Var	
A	0.1969	$p = 0.0018$
B	0.2678	$p < 0.0001$

En fin d'expérimentation, le nombre d'individus ayant perdu sa puce ou étant retrouvé mort, s'élevait à 134 (37.2%) pour l'essai A et à 153 (42.5%) pour l'essai B. Les différents cas rencontrés sont, soit la puce seule, soit la puce et les élytres encore collées retrouvées sur le sol, soit la puce avec l'individu entier parfois infecté par le champignon *Beauveria bassiana*. Une prédation par les crapauds *Chaunus marinus* a aussi été constatée.

Le test de Kolmogorov-Smirnov n'a montré aucune différence significative entre les mâles et les femelles sur le nombre de mouvements par nuit ni sur la distance parcourue par nuit ($p > 0.05$).

3.2.3 Effet des variétés sur le déplacement

Les quatre traitements testés dans l'essai A (trois variétés seules et le mélange de ces trois variétés) n'ont pas eu d'effet significatif sur le nombre de mouvements par nuits (**Tableau 6**) et sur la distance parcourue par nuit (**Tableau 7**).

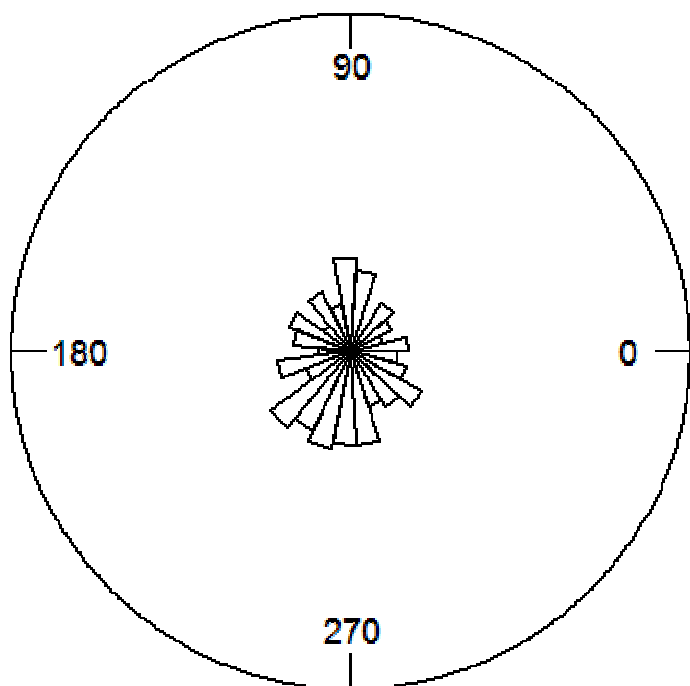


Figure 22. Fréquence des deux premiers angles des trajectoires des charançons lâchés après les résidus.

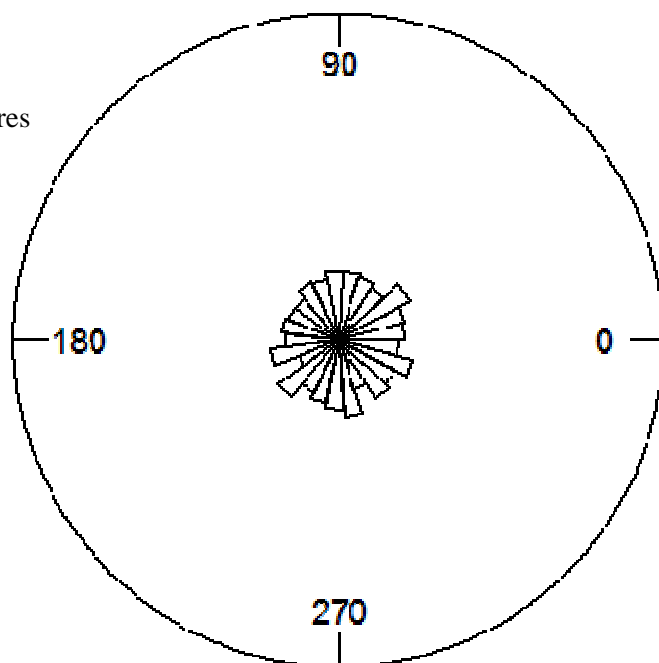


Figure 23. Fréquence des deux premiers angles des trajectoires des charançons lâchés dans les résidus.

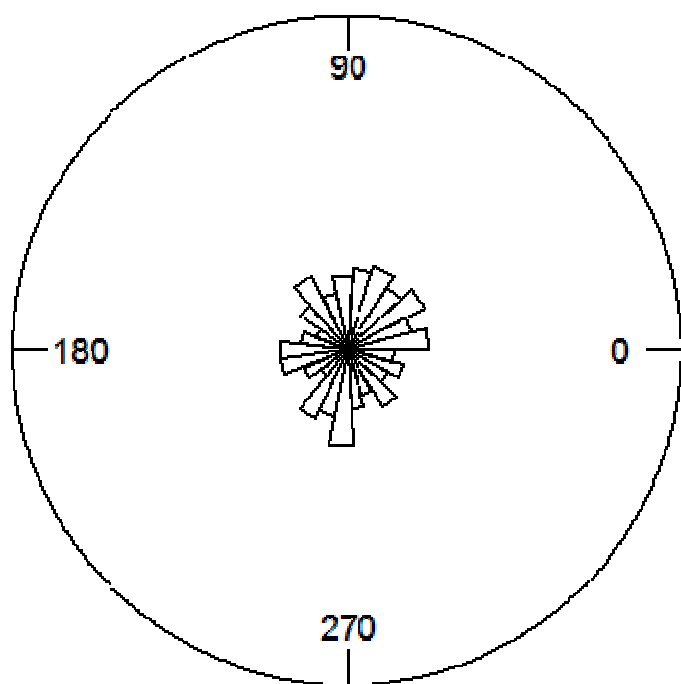


Figure 24. Fréquence des deux premiers angles des trajectoires des charançons lâchés avant les résidus.

Tableau 6. Résultat du test GLM avec pour variable à expliquer le nombre de mouvements par nuit. Df, degré de liberté ; Déviance expliquée, déviance expliquée par la variable ; Déviance résiduelle, déviance non expliquée par la variable. Le modèle n'explique pas significativement la déviance.

	Df	Déviance expliquée	Df	Déviance résiduelle	
null			196	11.46	
bloc	1	0.18	195	11.27	p = 0.074
traitement	3	0.11	192	11.16	p = 0.593

Tableau 7. Résultat du test GLM avec pour variable à expliquer la distance moyenne parcourue par nuit. Df, degré de liberté ; Déviance expliquée, déviance expliquée par la variable ; Déviance résiduelle, déviance non expliquée par la variable. Le modèle n'explique pas significativement la déviance.

	Df	Déviance expliquée	Df	Déviance résiduelle	
Null			283	165.66	
Bloc	1	0.25	282	165.41	p = 0.614
Traitement	3	1.67	279	163.738	p = 0.643

D'autre part les proportions d'individus sur chaque variété au cours du temps suivent les mêmes variations (**Figure 21**).

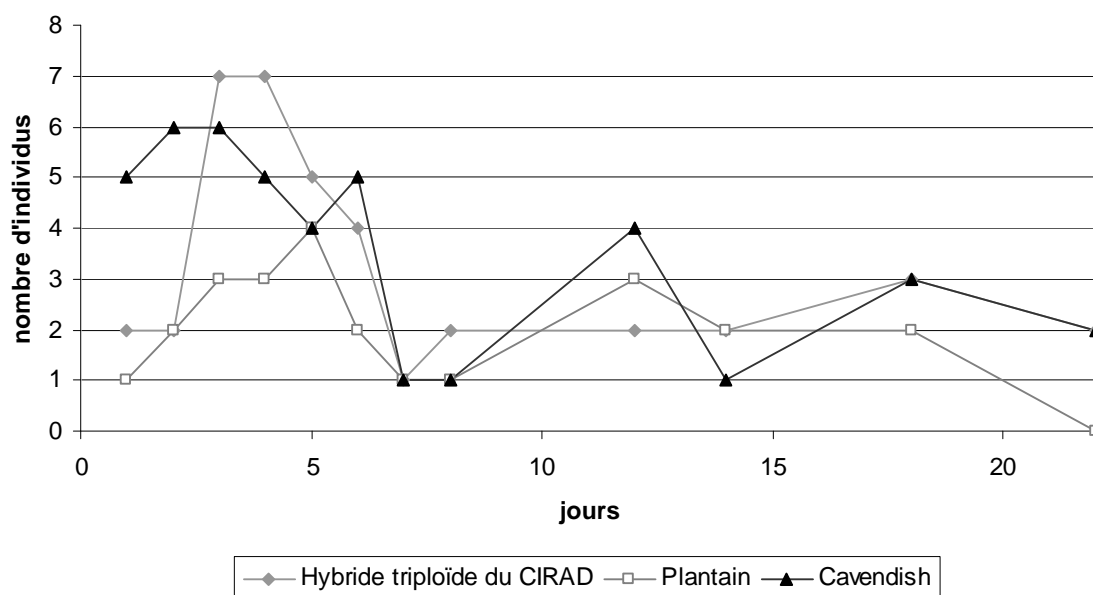


Figure 21. Nombre d'individus sur chaque variété au cours du temps.

3.2.4 Effet des résidus sur le déplacement

Le test GLM n'a pas montré d'effet de la disposition des résidus sur le nombre de mouvements par nuit ni sur la distance parcourue par nuit.

Une forte proportion d'angles est comprise entre 0° et -180° pour les individus lâchés après les résidus (**Figure 22**), entre 0° et -180° pour les individus lâchés avant les résidus (**Figure 24**). Pour les individus lâchés dans les résidus, aucune direction privilégiée n'est visible (**Figure 23**). Les moyennes

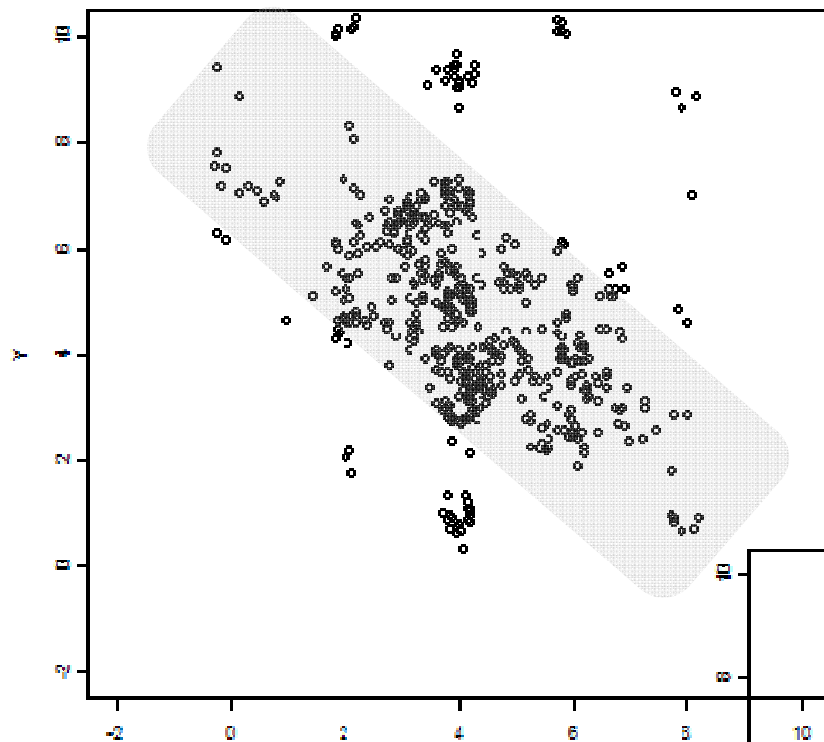


Figure 25. Ensemble des positions des charançons sur une parcelle élémentaire après le troisième jour. Superposition des 5 traitements ayant les résidus sur la diagonale gauche.

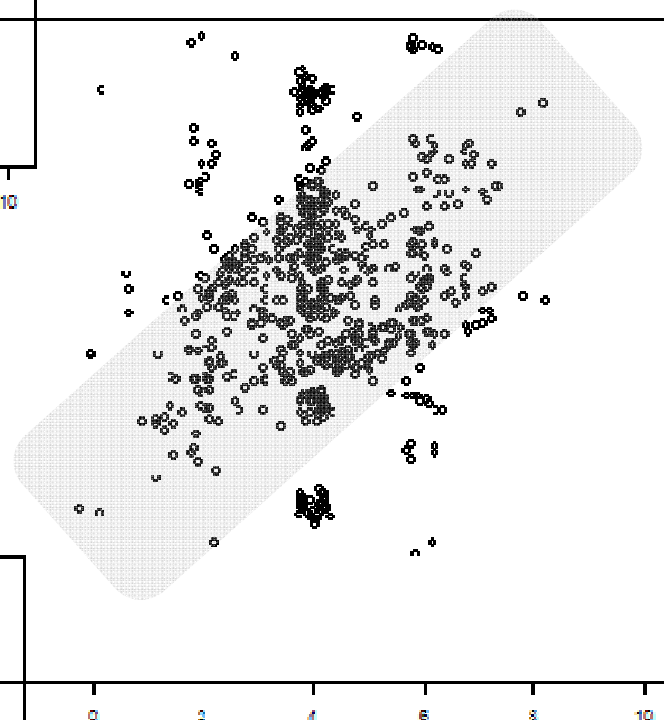


Figure 26. Ensemble des positions des charançons sur une parcelle élémentaire après le troisième jour. Superposition des 5 traitements ayant les résidus sur la diagonale droite.

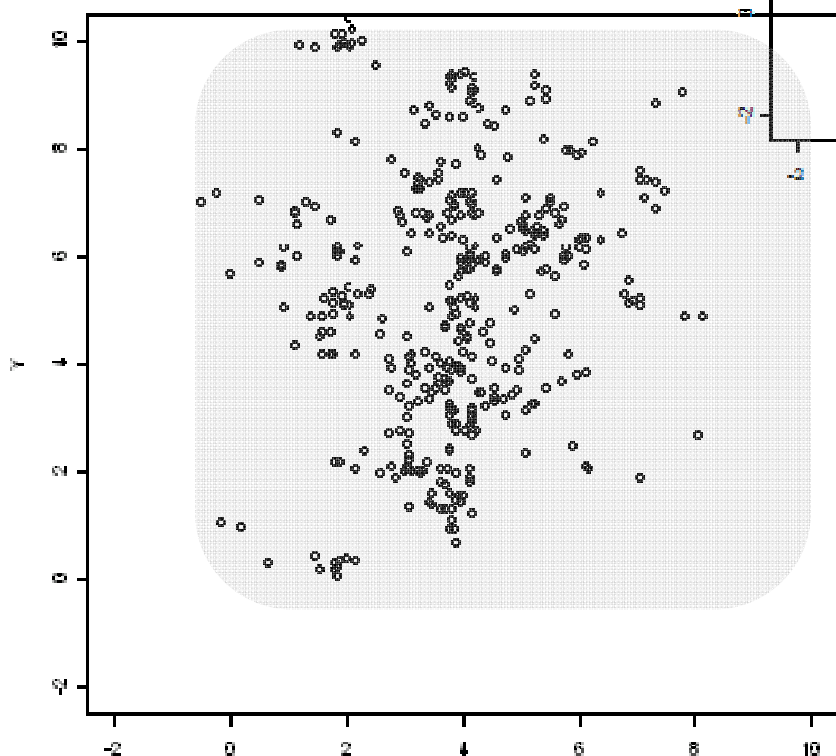


Figure 27. Ensemble des positions des charançons sur une parcelle élémentaire après le troisième jour. Superposition des 5 traitements ayant les résidus répartis de façon homogène.

des deux angles effectués par les trois premiers segments de la trajectoire des charançons étaient de 42.8° pour les charançons lâchés avant les résidus (dans le sens du repère utilisé pour les coordonnées des charançons), de -107.6° pour les charançons lâchés après les résidus et de 62.9° pour les individus lâchés dans les résidus. Dans les trois cas on observe une variance circulaire importante, entre 40° et 60° (**Tableau 8**).

Le test de Rayleigh a montré qu'il y a une direction moyenne significative du mouvement des charançons (**Tableau 9**). Ces angles moyens correspondent à un déplacement vers les résidus pour les charançons lâchés avant les résidus et après les résidus.

Tableau 8 : Essai B. Angles absolus. \bar{a} , moyenne des deux premiers angles des charançons et Var, variance circulaire des deux premiers angles.

	\bar{a}		Var	
	RAD	DEG	RAD	DEG
Charançons au sol avant les résidus	0.748	42.882	0.865	49.581
Charançons au sol après les résidus	-1.878	-107.607	0.776	44.477
Charançons dans les résidus	-0.051	-2.945	0.9095	52.113

Tableau 9 : Résultat du test d'uniformité de Rayleigh effectué sur les deux premiers angles absolus de la trajectoire des individus, avec Var, la variance circulaire.

	1-Var	
Charançons au sol avant les résidus	0.1346	p = 0.0290
Charançons au sol après les résidus	0.2237	p = 0.0005
Charançons dans les résidus	0.0904	p = 0.0152

L'occupation de l'espace par les charançons montre un regroupement des individus au niveau des résidus de culture, sur les parcelles où les résidus sont disposés en diagonale (**Figure 25 et 26**), en contraste avec les parcelles en répartition homogène des résidus (**Figure 27**)

3.2.5 Probabilités de passage d'un habitat à un autre

Une estimation des probabilités du taux de transition, $p(x_{it} | x_{j(t-1)})$, d'un habitat (bananier, résidu, sol nu) à un autre a été calculée sur la totalité des trajets effectués. Pour l'essai A la probabilité la plus élevée a été celle du passage d'un bananier à un autre bananier (**Tableau 10**). Pour l'essai B la probabilité la plus élevée a été le passage d'un résidu à un autre résidu (**Tableau 11**). Les probabilités de passage vers le sol nu étant les plus faibles, voir nulles dans l'essai B.

Tableau 10. Habitats. Probabilité de passage dans l'essai A. Probabilité de passer des lignes aux colonnes.

de\vers	->Bananier	-> Sol
Bananier ->	0.883	0.117
Sol ->	0.194	0.806

Tableau 11. Habitats. Probabilité de passage dans l'essai B. Probabilité de passer des lignes aux colonnes.

de\vers	Residus ->	Sol ->	Bananier ->
Residus ->	0.873	0.000	0.127
Sol ->	0.458	0.000	0.542
Bananier ->	0.190	0.000	0.810

4 Discussion

Nous avons montré que les charançons se déplacent d'environ 45cm par nuit, qu'ils ont tendance à faire demi-tour fréquemment et qu'ils se déplacent en moyenne une fois toutes les trois nuits. Aucun effet variété sur le déplacement n'est ressorti, par contre un effet des résidus à clairement été montré. D'autre part des probabilités de passage d'un habitat à un autre ont pu être calculées.

4.1 L'effet de la puce RFID sur le déplacement du charançon

Les premiers tests ont permis de montrer que la puce n'interfère pas sur la capacité de déplacement de l'insecte, en présence ou en absence de résidus. Donc malgré le poids relativement important de la puce, cette méthode est un bon moyen d'étudier le déplacement de l'insecte. En effet le charançon est un insecte marcheur et fouisseur qui n'utilise pas ces ailes (Froggatt, 1925; Gordon et Ordish, 1966; Greathead, 1986; Lemaire, 1996; Nonveiller, 1965; Pinese et Piper, 1994; Sponagel, *et al.*, 1995; Waterhouse et Norris, 1987). Le marquage (fixation du fil et enrobage de colle) a été réalisé de façon à limiter les risques d'accrochage dans les résidus et de façon à permettre le passage de la puce derrière le charançon dans les passages dégagés par celui-ci.

4.2 Expérimentation en plein champ

4.2.1 Efficacité de la méthode

Lors de l'essai A, dès le lâcher, une diminution rapide des effectifs a été observée, probablement à cause de l'absence de résidus, et donc de protection, en particulier face aux oiseaux présents sur les parcelles (le Quiscale merle, *Quiscalus lugubris* et le Coulicou manioc, *Coccyzus minor*). Les pertes ont été beaucoup plus faibles dans l'essai B, probablement à cause de la présence de résidus permettant aux individus de se cacher.

Une variation du nombre de recapture a été observée. Cela peut s'expliquer par les conditions climatiques qui limitaient l'efficacité des relevés. Les individus n'étant pas recapturés ont probablement été exportés hors de la zone d'observation par des prédateurs ou étaient enfouis trop profond. Il est aussi possible que dans certains cas la hauteur de résidus de culture ait été trop importante pour permettre la détection des individus.

Les taux de recapture après trois jours étaient de 48.7% pour l'essai A et 47.7% pour l'essai B. Delattre *et al.* (1980) obtient un taux de recapture de 40% après trois jours en utilisant des pseudo-troncs et en marquant les individus grâce à un système de numérotation inscrit sur l'insecte par thermocautérisation. Des taux de 32,4 % pour l'essai A après 22 jours et 62 % pour l'essai B après 29 jours ont été obtenus ; Delattre a obtenu 18% de recapture après un mois. La méthode de marquage par RFID permet donc d'obtenir des taux de recapture supérieurs à la méthode des pseudo-troncs, et un suivi individuel sans perturbation.

Sur salamandre la méthode RFID a permis des taux de recapture de 35,7% en utilisant des transpondeurs intégrés passifs (Blackwell et al. 2004 in (Hamed, *et al.*, 2008)), et des taux de 52.6% à 75% par radio télémetrie (Faccio 2003; Madison 1997; McDonough and Paton 2007; Montieth and Paton 2006 dans (Hamed, *et al.*, 2008)). Sur des coléoptères voiliers, Hedin *et al.* (2002) garde le contact avec 29% des femelles et 80% des mâles à 20 jours en utilisant des puces actives. Sur

charançons, nous avons obtenu 46.0% et 32.4% à respectivement 18 et 22 jours pour l'essai A et 64.2% et 61.1 % pour l'essai B.

Les taux de recapture obtenus sont donc supérieurs aux méthodes habituellement utilisées sur charançons et supérieurs aux taux obtenus avec des puces similaires sur salamandres. Ils sont assez proches des taux obtenus avec des puces actives, donc plus puissantes, sur des coléoptères voiliers. Ces résultats, associés au fait que chaque recapture n'interfère pas sur la vie du charançon qui n'est ni attiré par un piège, ni manipulé, ni cherché directement (déplacement des résidus donc de l'habitat proche) puisqu'il n'est pas nécessaire d'avoir un contact visuel avec l'individu pour l'identifier, en font une méthode adaptée pour le suivi des insectes marcheurs et ou fousisseurs ayant une faible capacité de dispersion.

4.2.2 Paramètres de dispersion de l'insecte

Les essais ont permis d'acquérir des données sur les caractéristiques de déplacement des charançons. En premier lieu, les distances des trajectoires sont très variables, cela est dû à des types de trajets très différents selon le milieu. Un individu proche d'un bananier va avoir tendance à effectuer plusieurs courts trajets autour de celui-ci, effectuant ainsi des trajets de quelques dizaines de centimètre. Puis il va soudainement passer à un autre bananier, effectuant ainsi un trajet de plusieurs mètres. Dans les résidus les charançons sont en permanence protégés et nourris par les résidus, si ceux-ci sont suffisamment frais, ce qui leur permet de rester à distance des bananiers et d'effectuer des trajets de taille intermédiaire.

D'autre part, concernant l'orientation des charançons on observe que les individus ont tendance à faire demi-tour fréquemment. Cela peut s'expliquer par le fait que les coléoptères en recherche d'habitat ont fréquemment ce comportement (Dajoz, 2002). En effet le lâcher dans une parcelle inconnue après une période de captivité met les charançons dans une situation de recherche d'habitat.

L'absence d'effet du sexe sur le déplacement est en contradiction avec Mestre et Rhino (1997) qui trouvent une plus grande activité des femelles.

Après trois jours la totalité des individus recapturés se trouve dans un rayon de 7m autour du point de lâcher pour l'essai A et de 8m pour l'essai B. Cela est en accord avec les résultats de Delattre *et al.* (1980) qui retrouve après trois jours la quasi-totalité des insectes recapturés au lieu de lâcher et aucun déplacements supérieurs à 7 m. Après 1 mois, il constate que certains individus se sont déplacés au delà de 10m du lieu de lâcher, dans nos essais certains individus se sont déplacés au delà de 10m, cependant les individus recapturés les derniers jours des essais sont tous dans un rayon de 4.4m et 11.4m respectivement pour les essais A et B. Ceci peut s'expliquer par le fait que Delattre utilisait des pièges attractifs pour les recaptures, dans notre cas, les individus étaient plus libres de revenir à leur point de départ.

Le charançon du bananier se place donc parmi les coléoptères parcourant de courtes distances. En effet nous montrons ici que le charançon parcourt en moyenne 45cm et 41cm par nuit, respectivement pour les essais A et B. Alors que certains coléoptères marcheurs sont capables de parcourir de grandes distances ; 77m par nuit pour *Carabus problematicus* ou 40m par jour pour *Carabus glabratus* (Dajoz, 2002).

4.2.3 Effet des variétés sur le déplacement

Nous n'avons pas montré de différence de déplacement des charançons entre les différents traitements comprenant différentes variétés de bananiers. Ni le nombre de déplacements par nuit, ni la distance parcourue par nuit n'ont été significativement différents entre les traitements comprenant les trois variétés de bananiers ou leur mélange. L'éventuelle attractivité d'une variété par rapport à l'autre n'apparaît pas sur ces essais, les proportions d'individus sur les trois variétés restent proches au cours

du temps, cependant le faible nombre d'individus recapturés sur ces traitements (traitements en mélange) ne permet pas de fournir un résultat fiable.

Ces résultats sont cohérents avec ceux de Pavis et Lemaire qui ont montré au laboratoire que la résistance des bananier est mécanique (dureté du rhizome) et que toutes les variétés présentent une forte attractivité (Lemaire, 1996; Pavis et Minost, 1992). De même, d'autres études ont montrées que toutes les variétés ont le même niveau d'attractivité et que la résistance vient de mécanismes d'antibiose (Kiggundu, *et al.*, 2007).

4.2.4 Effet des résidus sur le déplacement

L'analyse des angles absolus pour l'essai B montre que les individus lâchés sur sol nu s'orientent préférentiellement vers les résidus. Les charançons adultes étant attirés par les résidus de culture en décomposition (Gold, *et al.*, 2001), nous confirmons ici cela en plein champ et nous montrons que les résidus semblent orienter le déplacement des charançons à l'échelle d'une parcelle de 100m². Les bandes de résidus peuvent jouer un rôle de corridor dans le déplacement des charançons.

Nos résultats sont contradictoires avec ceux de Gold *et al.* (2004b) qui ont trouvé que des charançons se répartissaient à 46-66% proche des troncs de bananier et à 24-31% dans les résidus, laissant penser que les individus ont une préférence pour les bananiers.

4.2.5 Probabilités de passage d'un habitat à un autre

Les probabilités de passage ont pour but d'être utilisées dans le model COSMOS. Le grand nombre d'individus lâchés ainsi que la variabilité des positions de lâcher par rapport aux résidus et aux bananiers permettent d'évaluer ces probabilités de passage pour un grand nombre de situations possibles. Le fait que le passage de bananier à bananier et le passage de résidu à résidu soient ceux qui ressortent comme les plus probables peut s'expliquer par le fait que les trajets courts (autour d'un bananier ou autour d'un résidu) soient pris en compte.

4.3 Limites et perspectives

La méthode de marquage par puce RFID permet un suivi aux champs individuel des charançons, mais elle requière une importante charge de travail, due, en particulier, à la faible distance de détection. Ainsi le détecteur doit être passé sur toute la surface du sol et sur chaque plante. Il est donc difficile de travailler sur une surface de taille supérieure à celle de notre étude, celle-ci occupant déjà une journée complète pour un seul relevé. Le second problème que l'on doit remarquer est l'impossibilité de connaître l'état du charançon (vivant ou mort) lors du relevé, ce qui nous oblige à ne pas compter les individus qui ont cessé de bouger jusqu'à la fin de l'essai. On perd ainsi une partie de l'information car certains individus ne sont pas morts mais ont simplement cessé de bouger. En effet d'après Gold *et al* (2001) et Vilardebo (1960), une fraction importante de la population demeure immobile et sédentaire dans le sol. D'autre part l'âge des charançons lâchés n'est pas connu, or cela peut influencer sur leur capacité de dispersion. Mais la méthode de capture des individus utilisés pour les lâchers n'étant pas sélective elle permet de travailler avec un échantillon représentatif des populations de charançons sauvages, et donc d'évaluer la dynamique spatiale de ces populations, avec toute la diversité qu'elles contiennent, en matière d'âge notamment.

Les résultats obtenus permettent de proposer un certain nombre de mesures permettant de contrôler les populations de charançons du bananier. Tout d'abord, il ressort une importante diminution des effectifs liée à la prédation dans l'essai A, il paraîtrait donc intéressant de sortir les résidus de culture des parcelles et de les détruire car ceux-ci constitueraient, même en dehors de la

parcelle, un habitat pour les charançons. Cependant cette méthode est peu en accord avec les pratiques culturales utilisées en bananeraies. En effet les résidus de bananiers sont en quantité importante et lourds, les sortir de la parcelle constituerait donc une augmentation considérable de la charge de travail pour les agriculteurs. L'essai B a montré l'attractivité des résidus, il semblerait donc plus intéressant de regrouper les résidus dans le grand rang afin de les éloigner des bananiers, et d'éviter de constituer un « paillage » sur toute la surface de sol. Cela permettrait, en premier lieu, d'exposer les charançons aux prédateurs lorsqu'ils se déplacent sur le sol nu, et, en second lieu, de pouvoir optimiser l'utilisation des pièges à phéromone en les plaçant le long des résidus.

Par la suite il serait intéressant de poursuivre les recherches afin d'étudier l'effet barrière des ravines entre les parcelles et des chemins, et la recontamination d'une parcelle après une jachère. Il faudrait aussi tester, avec la méthode de marquage RFID, l'efficacité des pièges, ainsi que l'influence de l'organisation spatiale des pièges sur leur efficacité. Ces données supplémentaires permettraient d'avoir une connaissance très complète de la dynamique spatiale du charançon.

Conclusion

La dispersion des être vivants est un phénomène écologique de grande importance. Elle permet la colonisation de nouveaux milieux, et la recolonisation de milieux où l'espèce avait disparu. L'étude de la dispersion des ravageurs et la bonne compréhension des différents mécanismes qui la compose est essentielle en protection des plantes. Elle permet l'optimisation des méthodes de lutte et la mise en place de méthodes préventives.

Ces essais ont apporté des informations sur les caractéristiques de déplacement du ravageur *C. sordidus* et sur l'influence de l'environnement à petite échelle sur ses déplacements. Ces informations pourront être utilisées en tant que tel afin d'optimiser la gestion des parcelles en particulier en ce qui concerne les résidus, mais surtout elles seront intégrées à un modèle qui permettra de tester différents scénarios d'organisation parcellaire sur la dynamique des populations de charançons.

Liste bibliographique

- Arleu RJ & Neto SS (1984) Banana disease caused by *cosmopolites sordidus* (germ. 1824): Coleoptera: Curculionidae. *Broca da bananeira Cosmopolites sordidus* (Germ., 1824) (Coleoptera: Curculionidae). **34**:359.
- Bakyalire R (1992) A study of the life cycle and behaviour of the banana weevil *cosmopolites sordidus* germar, in uganda. Masters thesis, Makerere University, Uganda.
- Barbault R (1997) Ecologie générale. Structure et fonctionnement de la biosphère, Paris: Masson.
- Beccari F (1967) Contributo alla conoseenza del *cosmopolites sordidus* ger. (coleoptera: Curculionidae). *Rev. Agric. Subtrop.* **61**:131.
- Cardenas R & Arango LG (1987) Control del picudo negro *cosmopolites sordidus* (germar, 1824) del platanos musa aab (simmonds) mediante practicas culturales. *Cenicafe* **38**:50-61.
- Carnero A, Padilla A & Montesdeoca M (2002) Metodos alternativos para el control del picudo de la platanera *cosmopolites sordidus* germar, 1824 (coleoptera: Curculionidae). *Actividades del ICIA en Platanera*:75.
- Castrillon C (1991) Manejo del picudo negro (*cosmopolites sordidus* germar) en platano y banano de la zona cafetera de colombia. *ACORBAT: Mem.* **9**:349.
- Chabrier C (2005) Point technique sur les methodes de lutte contre le charançon du bananier.
- Chapman JW, Smith AD, Woiwod IP, Reynolds DR & Riley JR (2000) Development of vertical-looking radar technology for monitoring insect migration *21st International Congress on Entomology (ICE)*, Iguassu Falls, Brazil, 95-110.
- Cuillé J (1950) Recherches sur le charançon du bananier *cosmopolites sordidus*, germar: Monographie de l'insecte et recherche de ses chimiotropismes, Paris: IFAC *Série Technique* 4, 225.
- Cuillé J & Vilardebo A (1963) Les calandrinis nuisibles au bananier. In Balachowsky AS (ed) *Entomologie appliquée à l'agriculture*, Vol. Traité I (2): Masson, 1098-1114.
- Dajoz R (2002) Les coléoptères carabidés et tenébrionidés : Écologie et biologie., Paris: Lavoisier.
- Delattre P (1980) Recherche d'une méthode d'estimation des populations du charançon du bananier, *cosmopolites sordidus* germar (col., curculionidae). *Acta Oecologica : Oecologica Applicata* **1**:pp. 83-92.
- Froggatt JL (1925) The banana weevil borer (*cosmopolites sordidus*). *Queensland Journal of Agriculture* **24**:558.
- Gold CS, Kagezi GH, Night G & Ragama PE (2004a) The effects of banana weevil, *cosmopolites sordidus*, damage on highland banana growth, yield and stand duration in uganda. *Annals of Applied Biology* **145**:263-269.
- Gold CS, Night G, Ragama PE, Kagezi GH, Tinzaara W & Abera AMK (2004b) Field distribution of banana weevil *cosmopolites sordidus* (germar) adults in cooking banana stands in uganda. *International Journal of Tropical Insect Science* **24**:242-248.

- Gold CS, Pena JE & Karamura EB (2001) Biology and integrated pest management for the banana weevil *cosmopolites sordidus* (germar) (coleoptera: Curculionidae). *Integrated Pest Management Reviews* **6**:79-155.
- Gordon J & Ordish G (1966) Insect pests of banana *Pans manual no.1. Bananas*, London: Ministry of Overseas Development, 33-35.
- Greathead DJ (1986) Opportunities for biological control of insect pests in tropical africa. *Revue. Zool. Afr.* **100**:85-96.
- Hagler JR & Jackson CG (2001) Methods for marking insects: Current techniques and future prospects *Annual Review of Entomology*, Vol. 46, 511-543.
- Hamed MK, Ledford DP & Laughlin TF (2008) Monitoring non-breeding habitat activity by subterranean detection of ambystomatid salamanders with implanted passive integrated transponder (pit) tags and a radio frequency identification (rfid) antenna system. *Herpetological Review* **39**:303-306.
- Hedin J & Ranius T (2002) Using radio telemetry to study dispersal of the beetle osmoderma eremita, an inhabitant of tree hollows. *Computers and Electronics in Agriculture* **35**:171-180.
- Jardine NK (1924) Plantain root beetle borer (*cosmopolites sordidus* germar). *Tropical Agriculture* **62**:6.
- Kiggundu A, Gold CS, Labuschagne MT, Vuylsteke D & Louw S (2003) Levels of host plant resistance to banana weevil, *cosmopolites sordidus* (germar) (coleoptera: Curculionidae), in uganda musa germplasm. *Euphytica* **133**:267-277.
- Kiggundu A, Gold CS, Labuschagne MT, Vuylsteke D & Louw S (2007) Components of resistance to banana weevil (*cosmopolites sordidus*) in musa germplasm in uganda. *Entomologia Experimentalis et Applicata* **122**:27-35.
- Lassoudière A (2007) Le bananier et sa culture, Versailles, France: Editions Quae, 383.
- Lemaire L (1996) Les relations sémiochimiques chez le charançon du bananier *cosmopolites sordidus* germar (coleoptera: Curculionidae) et la résistance de sa plante-hôte, le bananier, Université de Montpellier II, Montpellier.
- Longoria A (1968) Diferencias sexuales en la morfologia externa de *cosmopolites sordidus* germar (coleoptera, curculionidae). *Ciencias Biologicas, La Habana* **1**:1.
- Mestre J (1995) Reconnaissance des sexes chez le charançon du bananier, *cosmopolites sordidus* (germar, 1824) (coleoptera cucurlionidae): CIRAD, 8.
- Mestre J (1997) Recent research on the banana weevil, *cosmopolites sordidus* (germar, 1824) (coleoptera, curculionidae). *Fruits Paris* **52**:67-82.
- Mestre J & Rhino B (1997) Les études sur le charançon des bananiers, *cosmopolites sordidus* (germar, 1824) - bilan sommaire, Neufchâteau: CIRAD-FLHOR, 20 pp.+annexes.
- Mestre J & Risède J-M (1997) Les ravageurs de la bananeraie antillaise. Biologie et méthodes de lutte: CIRAD, 58 pp.

- Mociño-Deloya E, Setser K, Pleguezuelos JM, Kardon A & Lazcano D (2008) Cannibalism of nonviable offspring by postparturient mexican lance-headed rattlesnakes, *crotalus polystictus*. *Animal Behaviour*.
- Molet M, Chittka L, Stelzer RJ, Streit S & Raine NE (2008) Colony nutritional status modulates worker responses to foraging recruitment pheromone in the bumblebee *bombus terrestris*. *Behavioral Ecology and Sociobiology* **62**:1919-1926.
- Moznette GF (1920) Banana root-borer. *J. Agric. Res.* **19**:39.
- Nahif AA, Koppenhöfer A & Madel G (1994) Morphology, biology and importance of *cosmopolites sordidus*, germar, 1824 (coleoptera: Curculionidae). *Zeits. Angwe. Zool.* **80**:435.
- Nonveiller G (1965) Comment protéger les bananiers contre les attaques du charançon. *Camer. Agric. Past. For.* **87**:32-43.
- Pavis C (1988) Quelques aspects comportementaux chez le charançon du bananier *cosmopolites sordidus* germar (coleoptera:Curculionidae) *Nematodes and the Borer Weevil in Bananas : Proceedings of a Workshop*, Bujumbura, Burundi: Montpellier, France: INIBAP, 58-61.
- Pavis C & Minost C (1992) Etude des mécanismes de résistance du bananier face au charançon *cosmopolites sordidus* germar (coleoptera : Curculionidae) : Rôle de l'attractivité du pseudo-tronc et des propriétés physiques de rhizome.
. *Symposium International sur l'amélioration génétique du bananier pour la résistance aux maladies et ravageurs*.
- Pinese B & Piper R (1994) Bananas: Insect and mite management: Department of Primary Industries, Queensland, Australia, 67.
- R_Development_Core_Team (2009) R: A language and environment for statistical computing, Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Reynolds DR & Riley JR (2002) Remote-sensing, telemetric and computer-based technologies for investigating insect movement: A survey of existing and potential techniques. *Computers and Electronics in Agriculture* **35**:271-307.
- Riley JR & Smith AD (2000) Design considerations for an harmonic radar to investigate the flight of insects at low altitude *21st International Congress on Entomology (ICE)*, Iguassu Falls, Brazil, 151-169.
- Rukazambuga NDTM, Gold CS & Gowen SR (1998) Yield loss in east african highland banana (*musa* spp., aaa-ea group) caused by the banana weevil, *cosmopolites sordidus* germar. *Crop Protection* **17**:581-589.
- Silva SdO & Fancelli M (1998) Banana insect pests. In Galan V (ed) *Proceedings of an international symposium on banana subtropical*, Tenerife, Spain, 385-393.
- Sponagel KW, Diaz FJ & Cribas A (1995) El picudo negro del platano, *cosmopolites sordidus* germar, La Lima, Honduras: FHIA, 35 pp.+plates.
- Stover RH & Simmonds NW (1987) Bananas:Third edition:469 pp.
- Streit S, Bock F, Pirk CWW & Tautz J (2003) Automatic life-long monitoring of individual insect behaviour now possible. *Zoology* **106**:169-171.

Sumner S, Lucas E, Barker J & Isaac N (2007) Radio-tagging technology reveals extreme nest-drifting behavior in a eusocial insect. *Current Biology* **17**:140-145.

Tinzaara W, Gold CS, Dicke M, Huis Av & Ragama PE (2005a) Factors influencing pheromone trap effectiveness in attracting the banana weevil, *cosmopolites sordidus*. *International Journal of Pest Management* **51**:281-288.

Tinzaara W, Gold CS, Kagezi GH, Dicke M, Huis Av, Nankinga CM, Tushemereirwe W & Ragama PE (2005b) Effects of two pheromone trap densities against banana weevil, *cosmopolites sordidus*, populations and their impact on plant damage in uganda. *Journal of Applied Entomology* **129**:265-271.

Treverrow N (1985) Banana weevil borer. *Agfacts H6. AE.1*:1-3.

Treverrow N, Peasley D & Ireland G (1992) Banana weevil borer : A pest management handbook for banana growers: Banana Industry Committee, New South Wales Agriculture, 28.

Treverrow NL & Bedding RA (1993) Development of a system for the control of the banana weevil borer, *cosmopolites sordidus* with entomopathogenic nematodes. In Bedding R, Akhurst R, Kaya H (eds) *Nematodes and the biological control of insect pests*, Melbourne, Australia: CSIRO, 41-47.

Veitch R (1929) The banana weevil borer. In Simmonds JH (ed) *Pest and diseases of queensland fruits and vegetables*, pp. 255-263.

Vilardebo A (1960) Los insectos y nematodos de las bananeras del ecuador, Paris: Instituto Franco-Euaotiano de Investigaciones Agronomicas, 78 pp.

Vilardebo A (1973) Le coefficient d'infestation, critère d'évaluation du degré d'attaques des bananeraies par *cosmopolites sordidus* germ. Le charançon noir du bananier. *Fruits* **28**:417.

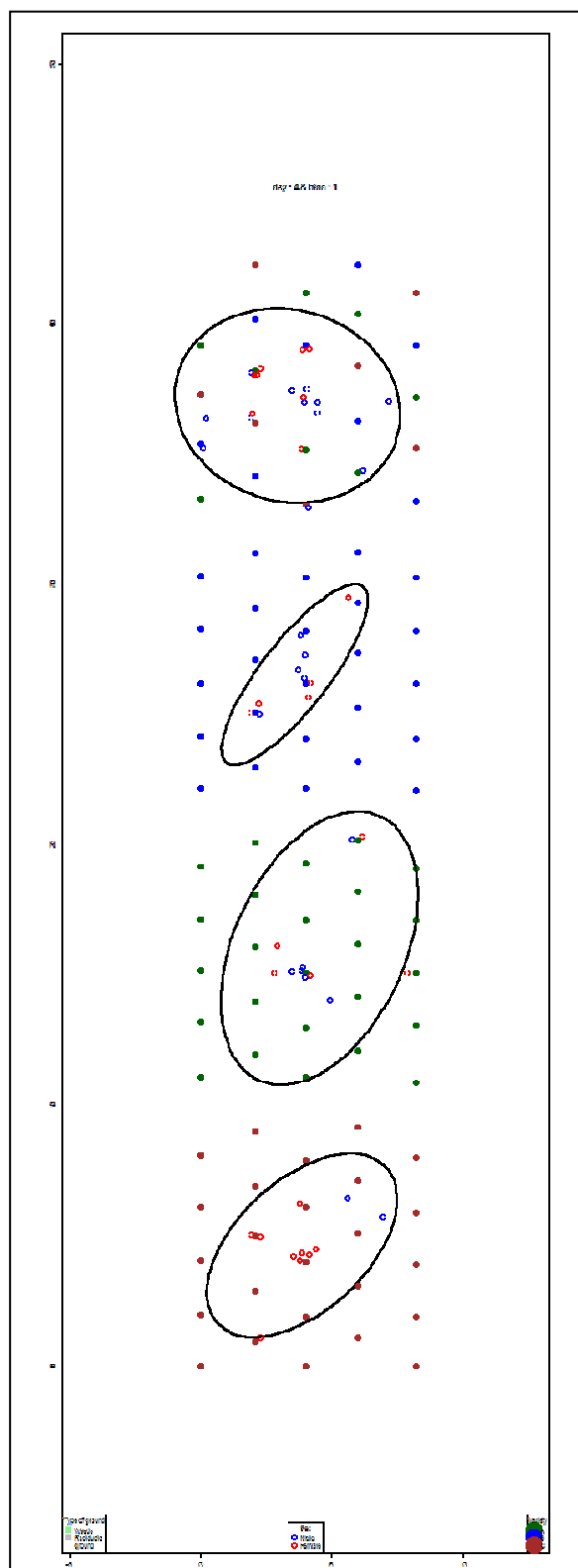
Vinatier F, Tixier P, Le Page C, Duyck P-F & Lescourret F (2009) Cosmos, a spatially explicit model to simulate the epidemiology of *cosmopolites sordidus* in banana fields. *Ecological Modelling* **220**:2244-2254.

Wallace CR (1938) Measurement of beetle borer migration in banana plantations. *J. Aust. Inst. Agric. Sci* **4**:215-219.

Waterhouse DF & Norris KR (1987) *Cosmopolites sordidus*. In Waterhouse DF, Norris KR (eds) *Biological control: Pacific prospects*, Melbourne, Australia: Inkata Press, 152-158.

Whalley P (1957) The banana weevil and its control. *East Afr. Agric. J.* **23**:110-112.

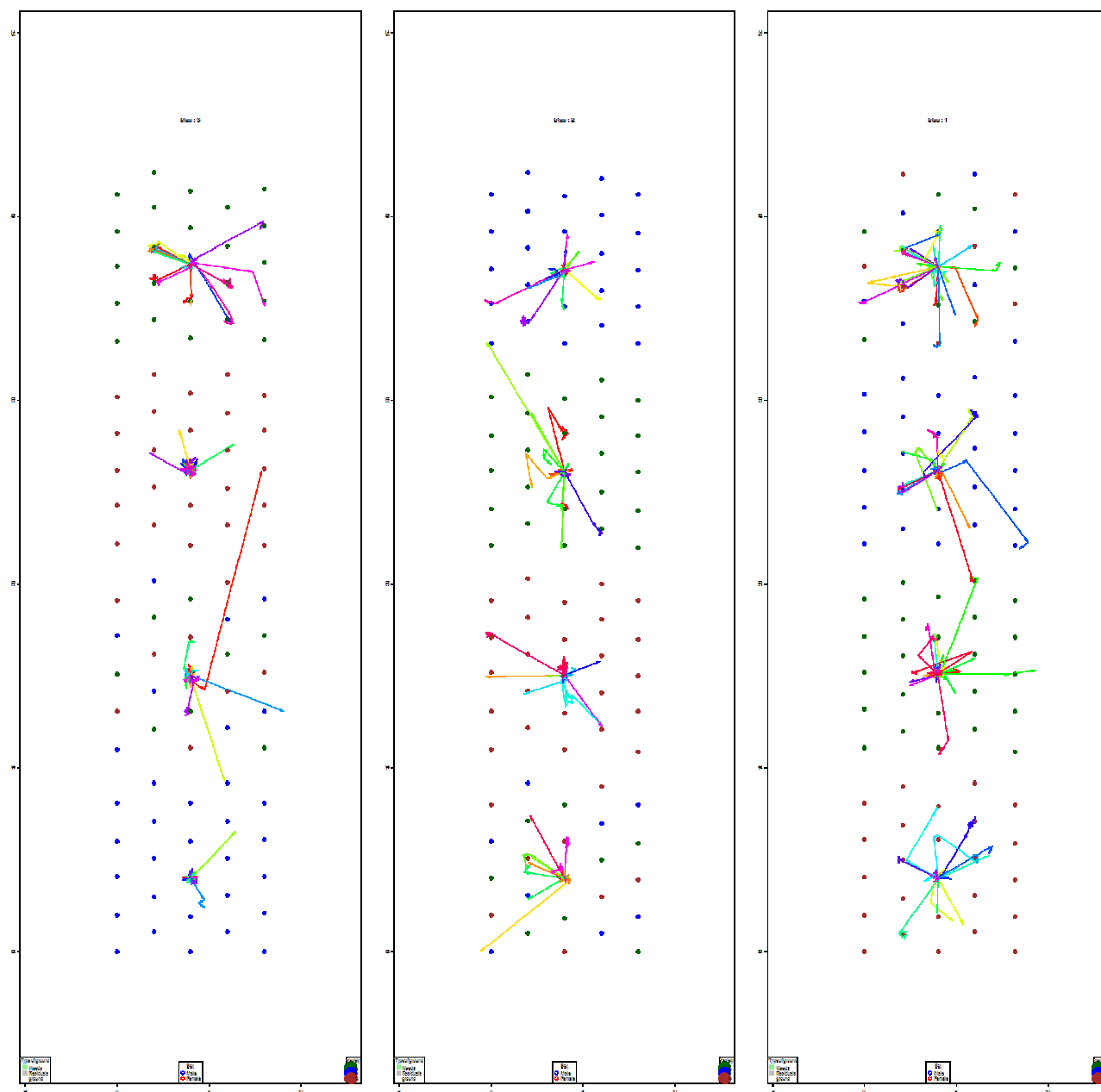
Annexe I



Essai B. Carte des positions des charançons sur le bloc 1 au jour 4.

Annexe II

Essai A. Carte de tous les segments de la trajectoire des charançons du premier au dernier jour.



Annexe IIbis

Essai B. Carte de tous les segments de la trajectoire des charançons du premier au dernier jour. En grisé la disposition des résidus de culture.

